

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Edi Kirasić

Zagreb, 2019.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentori:

Prof. dr. sc. Neven Duić, dipl. ing.

Student:

Edi Kirasić

Zagreb, 2019.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se prof. dr. sc. Nevenu Duiću dipl. ing. koji mi je omogućio izradu rada na ovu temu. Nadalje, želio bih se zahvaliti Hrvoju Dorotiću mag. ing. na velikodušnoj pomoći i izdvojenom vremenu tijekom izrade ovog rada.

Edi Kirasić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Edi Kirasić** Mat. br.: 0035199944

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Tehno-ekonomska analiza kogeneracijskog postrojenja spojenog na centralizirani toplinski sustav grada Ogulina**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Techno-economic analysis of a cogeneration plant connected to the district heating system of the City of Ogulin**

Opis zadatka:

Europska unija je povećala ciljeve za 2030. godinu, vezane za energetske učinkovitost, na 32,5%. Njeno povećanje predstavlja izazov zato što će cilj za 2020. godinu, koji iznosi 20%, teško biti dostignut. U Strategiji grijanja i hlađenja Europske unije, centralizirani toplinski sustavi u kombinaciji s istovremenom proizvodnjom toplinske i električne energije (kogeneracijom) su navedeni kao potencijalna tehnologija koja može pridonijeti ispunjavanju navedenih ciljeva. Najveća prednost takvih sustava je mogućnost korištenja niskotemperaturne otpadne topline iz industrijskih procesa koja se može koristiti za pokrivanje toplinskih potreba zgrada. Uz to, kogeneracijska postrojenja imaju mogućnost korištenja tržišne premije koja dodatno može povećati ukupnu isplativost projekta i potencijalno smanjiti cijenu toplinske energije za krajnje korisnike. Cilj ovoga rada je izrada tehno-ekonomske analize kogeneracijskog postrojenja spojenog na centralizirani toplinski sustav grada Ogulina.

U sklopu rada potrebno je:

1. Izraditi detaljan pregled literature o kogeneracijskim postrojenjima i centraliziranim toplinskim sustavima;
2. Detaljno opisati sustav poticanja tržišnom premijom;
3. Razraditi najmanje 3 scenarija među kojima barem jedan obuhvaća djelomično pokrivanje toplinskih potreba grada Ogulina;
4. Izraditi tehno-ekonomsku analizu i izračunati cijenu toplinske energije za korisnike centraliziranog toplinskog sustava.

Potrebni podaci i literatura se mogu dobiti kod mentora. U radu navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

29. studenog 2018.

Rok predaje rada:

1. rok: 22. veljače 2019.
2. rok (izvanredni): 28. lipnja 2019.
3. rok: 20. rujna 2019.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 25.2. - 1.3. 2019.
2. rok (izvanredni): 2.7. 2019.
3. rok: 23.9. - 27.9. 2019.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Neven Duić

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Igor Balen

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA	V
POPIS KRATICA	VI
POPIS OZNAKA	VII
SAŽETAK	IX
SUMMARY	X
1. UVOD	1
2. BIOMASA I NJEZINA PRIMJENA U ENERGETSKOM SEKTORU	3
2.1. Drvna biomasa	5
2.1.1. Drvna sječka	6
2.2. Kogeneracijska postrojenja na biomasu	8
2.2.1. Dobivanje energije iz biomase	9
2.2.1.1. Izgaranje biomase	10
2.2.1.2. Rasplinjavanje biomase	11
2.2.2. Tehnološki proces u kogeneraciji	11
2.2.2.1. Postrojenja s Rankineovim kružnim procesom	11
2.2.2.2. Korištenje plinskih i parnih motora	12
2.2.2.3. Postrojenja s plinskim turbinama s indirektnim izgaranjem	13
2.2.2.4. Organski Rankineov ciklus (ORC)	13
2.2.3. Kogeneracija u Hrvatskoj	15
2.3. Centralizirani toplinski sustavi	16
2.3.1. Centralizirani toplinski sustavi u Hrvatskoj	17
3. POTICANJE PROZVODNJE ELEKTRIČNE ENERGIJE TRŽIŠNOM PREMIJOM	19
3.1. Metodologija izračuna iznosa tržišne premije	21
4. METODA	25
4.1. Tehnički proračun postrojenja	25
4.1.1. Proračun nazivnog električnog opterećenja i godišnje potrošnje električne energije	26
4.1.2. Proračun toplinskog opterećenja i godišnje potrošnje toplinske energije	27
4.1.3. Dimenzioniranje priključka na centralizirani toplinski sustav	28
4.2. Ekonomska analiza planiranog postrojenja	29
4.2.1. Prihodi	29
4.2.2. Rashodi	31
4.2.2.1. Izračun investicijskog troška izgradnje ORC-a i troška održavanja	31
4.2.2.2. Izračun troškova izgradnje priključka na postojeći CTS	32
5. ANALIZA SLUČAJA	33
5.1. Scenarij 1	34
5.1.1. Scenarij 1-a	34
5.1.2. Scenarij 1-b	35
5.2. Scenarij 2	36

5.3. Scenarij 3	36
5.4. Scenarij 4	37
6. REZULTATI TEHNO-EKONOMSKE ANALIZE KOGENERACIJSKOG POSTROJENJA	39
6.1. Scenarij 1	39
6.1.1. Scenarij 1-a	39
6.1.2. Scenarij 1-b	41
6.2. Scenarij 2	42
6.2.1. Scenarij 2-a	43
6.2.2. Scenarij 2-b	44
6.3. Scenarij 3	45
6.3.1. Scenarij 3-a	46
6.3.2. Scenarij 3-b	48
6.4. Scenarij 4	49
6.4.1. Scenarij 4-a	51
6.4.2. Scenarij 4-b	52
7. ZAKLJUČAK	55
LITERATURA	56
PRILOZI	60

POPIS SLIKA

Slika 1.	Kružni tok CO ₂ u prirodi posredstvom biomase [7]	3
Slika 2.	Proizvodnja električne energije iz biomase u EU [10].....	4
Slika 3.	Udjeli u proizvodnji primarne energije u RH 2008. i 2013. [2]	4
Slika 4.	Drvni ostaci nastali obradom u drвноj industriji [11]	5
Slika 5.	Utjecaj vlažnosti na ogrjevnu vrijednost [12].....	6
Slika 6.	Drvena sječka [12]	6
Slika 7.	Primjer skladišta drvene sječke konstruiranog u tvrtki iNGENIEUERBÜRO DANNENBERG GmbH & Co. KG [13].....	7
Slika 8.	Ogrjevna vrijednost drvene sječke s obzirom na uvjete rasta, vrstu stabla, veličinu komada i udio vode [12].....	8
Slika 9.	Usporedba gubitaka u odvojenoj i kogeneracijskog proizvodnji energije [15]	9
Slika 10.	Izgaranje biomase na kosoj rešetki [17]	10
Slika 11.	Shema protustrujnog i istostrujnog reaktora [15]	11
Slika 12.	Shema kogeneracijskog postrojenja osnovanog na Rankineovom kružnom procesu [18]	12
Slika 13.	Shematski prikaz ORC postrojenja [15].....	13
Slika 14.	T,s-dijagram vode i različitih organskih medija [19]	14
Slika 15.	Postojeći CTS-i u Republici Hrvatskoj [29]	18
Slika 16.	Udio pojedinih izvora energije u dobivenoj toplini u CTS [29]	18
Slika 17.	Usporedba feed-in tariff poticaja s feed-in premium [32]	20
Slika 18.	Mogući slučajevi s tržišnom premijom u usporedbi s feed-in tarifom [33]	24
Slika 19.	Tehnologija koja se koristi pri određenim nazivnim snagama [15]	25
Slika 20.	Temperaturni režimi za različite procese u drвноj industriji [34]	26
Slika 21.	Prosječna potrošnja električne energije tijekom dana	26
Slika 22.	Prikaz postojećih ZTS-a i planiranog ORC-a	28
Slika 23.	Specifični investicijski trošak ORC postrojenja	32
Slika 24.	Pilana postrojenja u Ogulinu [50]	33
Slika 25.	Dnevni dijagram proizvodnje i potrošnje električne energije	35
Slika 26.	Prikaz odnosa kretanja tržišnih cijena i referentne vrijednosti	36
Slika 27.	Raspodjela korištenja energije u scenariju 1	39
Slika 28.	Analiza osjetljivosti scenarija 1-a	40
Slika 29.	Analiza osjetljivosti scenarija 1-b	42

Slika 30.	Raspodjela korištenja energije u scenariju 2.....	42
Slika 31.	Analiza osjetljivosti scenarija 2-a	43
Slika 32.	Analiza osjetljivosti scenarija 2-b	44
Slika 33.	Trasa cjevovoda od ORC-a do ZTS-a grada Ogulina	45
Slika 34.	Raspodjela korištenja energije u scenariju 3.....	46
Slika 35.	Analiza osjetljivosti scenarija 3-a	47
Slika 36.	Analiza osjetljivosti scenarija 3-b	49
Slika 37.	Trasa cjevovoda od ORC-a do oba ZTS-a grada Ogulina.....	50
Slika 38.	Raspodjela korištenja energije u scenariju 4.....	50
Slika 39.	Analiza osjetljivosti scenarija 4-a	52
Slika 40.	Analiza osjetljivosti scenarija 4-b	53
Slika 41.	Kretanje stupnja iskoristivosti i IRR-a	54

POPIS TABLICA

Tablica 1. Razlike između ORC-a i Rankineova procesa s vodenom parom [19] [20] [21] ..	15
Tablica 2. Broj povlaštenih proizvođača i nositelja projekata za pojedini OIE te njihova snaga	16
Tablica 3. Prednosti i nedostaci otkupa s tržišnom premijom [30]	19
Tablica 4. Usporedba fiksne i promjenjive tržišne premije [31]	20
Tablica 5. Prikaz dijela tablice za određivanje dimenzija cjevovoda [41]	29
Tablica 6. Proizvodna jedinica s vršnim toplinskim opterećenjem	33
Tablica 7. Proizvodnja i potrošnja određenih drvnih proizvoda	34
Tablica 8. Prikaz pojedinih tarifnih stavki [44]	35
Tablica 9. Tehno-ekonomski parametri korišteni u analizi	37
Tablica 10. Zbirni prikaz karakteristika postrojenja pojedinih scenarija	38
Tablica 11. Rezultati tehno-ekonomske analize scenarija 1-a	40
Tablica 12. Rezultati tehno-ekonomske analize scenarija 1-b	41
Tablica 13. Rezultati tehno-ekonomske analize scenarija 2-a	43
Tablica 14. Rezultati tehno-ekonomske analize scenarija 2-b	44
Tablica 15. Rezultati tehno-ekonomske analize scenarija 3-a	47
Tablica 16. Rezultati tehno-ekonomske analize scenarija 3-b	48
Tablica 17. Rezultati tehno-ekonomske analize scenarija 4-a	51
Tablica 18. Rezultati tehno-ekonomske analize scenarija 4-b	52
Tablica 19. Zbirni prikaz rezultata tehno-ekonomske analize scenarija	53

POPIS KRATICA

Kratika	Puni naziv
OIE	Obnovljivi izvori energije
CTS	Centraliziran toplinski sustav
ZOIEVUK	Zakon o obnovljivim izvorima energije i visokoučinkovitoj kogeneraciji
ORC	Organski Rankineov ciklus
Registar OIEKPP	Registar projekata i postrojenja za korištenje obnovljivih izvora energije
HROTE	Hrvatski operator tržišta energije
HERA	Hrvatska energetska regulatorna agencija
CROPEX	Croatian Power Exchange Ltd.
BPS	Slovenian Power Spot Exchange
HUPX	Hungarian Power Exchange Ltd.
NPV	Neto sadašnja vrijednost
IRR	Unutarnja stopa povrata
PP	Period povrata

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
TP_i	kn/kWh	tržišna premija za svako pojedino proizvodno postrojenje ili proizvodnu jedinicu u obračunskom razdoblju
RV	kn/kWh	referentna vrijednost električne energije utvrđena ugovorom o tržišnoj premiji
TC_i	kn/kWh	referentna tržišna cijena električne energije u obračunskom razdoblju
PT	kn/kWh	proizvodni troškovi
T_{inv}	kn/kWh	investicijski troškovi
T_{op}	kn/kWh	operativni troškovi (bez troškova goriva)
Inv	kn/kW	ukupni investicijski troškovi po jedinici instalirane snage
flh	h	godišnji ekvivalentni sati rada proizvodnog postrojenja
$WACC$	%	ponderirana prosječna stopa povrata na kapital
n	god	vrijeme trajanje ugovora o premiji
eq	%	udio vlastitog financiranja u investicijskim troškovima
roe	%	tražena stopa povrata na vlastito ulaganje
r	%	kamatna stopa na pozajmljena sredstva
O_p	kn/kW	ukupni godišnji operativni troškovi (bez troškova goriva) po jedinici instalirane snage
flh	h	godišnji ekvivalentni sati rada proizvodnog postrojenja
Q_n	kWh	godišnja potrošnja toplinske energije
V_s	m ³ /dan	trenutna dnevna potrošnja drvene sječke
ρ_s	kg/m ³	gustoća drvene sječke
H_{ds}	kWh/kg	donja ogrjevna vrijednost drvene sječke
t	h	broj radnih sati postrojenja u godini
Q_{pn}	kWh	godišnja potrošnja toplinske energije za prešanje
Q_{ppar}	kWh/m ²	specifična potrošnja toplinske energije za prešanje parketa

A_{par}	m^2/mj	mjesečna proizvodnja parketa
Q_{pp}	kWh/t	specifična potrošnja toplinske energije za prešanje drvnih peleta
m_p	t/mj	mjesečna proizvodnja drvnih peleta
Q_{pb}	kWh/t	specifična potrošnja toplinske energije za prešanje briketa
m_b	t/mj	mjesečna proizvodnja briketa
P_p	kn	prihod od prodaje električne energije na tržištu
E_{ti}	kWh	količina prodane električne energije u i-tom satu
C_{tei}	kn/kWh	tržišna cijena električne energije u i-tom satu
P_{tp}	kn	prihod od tržišne premije
T_{pi}	kn/MWh	iznos tržišne premije
E_{ti}	MWh	količina prodane električne energije na tržištu
P_u	kn	prihod od uštede električne energije
E_u	kWh	ušteda električne energije
C_e	kn/kWh	kupovna cijena električne energije
P_q	kn	prihod od naknade za isporučenu toplinsku energiju
Q_{ni}	kWh	isporučena toplina
C_q	kn/kWh	tarifna stavka za isporučenu toplinu
P_n	kn	prihod od naknade za ugovorenu toplinsku snagu
C_n	kn/kW	tarifna stavka snaga
Φ_{ni}	kW	iznos ugovorene toplinske snage
C_{ORC}	$€/kWe$	specifična investicijska cijena ORC postrojenja
P_{el}	kWe	nazivna snaga ORC postrojenja

SAŽETAK

Borba protiv globalnog zatopljenja posljednjih godina postaje glavni prioritet međunarodne zajednice pa tako i Hrvatske. Potiče se povećanje energetske učinkovitosti u gradnji i upotreba obnovljivih izvora energije kako bi se zaustavile emisije štetnih plinova u atmosferu. Iz tog razloga, u fokus ove tehno-ekonomske analize stavljena je biomasa, jedna od obnovljivih izvora energije, kojom obiluje Republika Hrvatska.

Prikazane su glavne karakteristike biomase kao i postupak kojim se iz biomase dobiva korisna energija. Opisana su kogeneracijska postrojenja u kojima se izgaranjem biomase istovremeno dobiva toplinska i električna energija. Poseban naglasak stavljen je na ORC (Organic Rankine Cycle) kogeneracijska postrojenja gdje se kao posrednik u pretvorbi energije koristi organski medij. Prikazan je i model poticaja tržišnom premijom kojom se potiče proizvodnja električne energije iz obnovljivih izvora energije.

Poznavanjem tih osnova te uz podatke iz prakse izvedena je metoda za provedbu tehno-ekonomske analize izgradnje ORC postrojenja uz postojeću tvornicu parketa u Ogulinu. Tvornica ima velike potrebe za toplinskom i električnom energijom, a sadašnji način dobivanja korisne energije može se unaprijediti. Metoda prikazuje i razrađuje sve važne ulazne i izlazne parametre koji služe za ocjenjivanje isplativosti izgradnje ovakvih postrojenja.

Sama analiza projekta pokazala je najveću isplativost kada se postrojenje dimenzionira prema baznom električnom opterećenju i kada se uz cijenu prodane električne energije isplaćuje tržišna premija. Isplativost spajanja na CTS grada Ogulina pokazala se upitnom zbog niske linearne gustoće toplinske energije i malih prihoda od prodaje energije, no u tim slučajevima stupnjevi iskoristivosti biomase su najveći. Isplativost ulaganja u CTS povećala bi se spajanjem većeg broja potrošača.

Ključne riječi: biomasa, kogeneracijsko postrojenje, ORC, tržišna premija, CTS

SUMMARY

The battle against global warming has become an absolute priority in recent years among the international community, including Croatia. Increasing energy efficiency in construction and the use of renewable energy sources are encouraged to stop the emission of harmful gases into the atmosphere. For this reason, biomass, one of the renewable energy sources, which Republic of Croatia is abounded with, has been put into the focus of techno-economic analysis.

The main characteristics of biomass are presented as well as processes of obtaining useful energy from it. Cogeneration plants are described where combustion of biomass simultaneously produces heat and electricity. Particular emphasis is placed on ORC (Organic Rankine Cycle) cogeneration plants where an organic fluid is used as an energy conversion agent. The model of feed-in premium incentive is shown. It subsidizes production of electricity from renewable energy sources.

Knowing these basics and with data from practice, the method, for the technical-economic analysis of the construction of the ORC plan near the existing parquet factory in Ogulin, is carried out. The factory has a great need for heat and electricity, and current way of obtaining useful energy can be improved. The method presents and elaborates all important input and output parameters used to evaluate the feasibility of constructing such facility.

Projects analysis has shown highest cost-effectiveness when plant is dimensioned to base electric load and when producer receives feed-in premium for sold electricity. The cost-effectiveness of the connection to the Ogulin district heating system has been questionable due to low linear heat density and low revenues from selling heat, but those cases have shown highest biomass usage efficiency. The viability of investing in connection to the district heating would increase with a greater number of consumers in the grid.

Key words: biomass, cogeneration plant, ORC, feed-in premium, district heating

1. UVOD

Brojna znanstvena istraživanja potvrđuju da je globalno zatopljenje, uzrokovano štetnim emisijama stakleničkih plinova, problem koji se mora rješavati. Kako bi se pokušalo najprije ublažiti zatopljenje, a kasnije i eliminirati, na međunarodnoj razini postignuti su brojni dogovori i sporazumi. Jedan od njih je i Pariški sporazum iz 2015. godine kojim se želi ograničiti porast prosječne temperature na manje od 2°C. On omogućava svakoj državi potpisnici da sama odredi mjere u toj borbi, pritom pazeći da ekonomski razvoj pojedine zemlje ne bude ugrožen [1].

Republika Hrvatska jedna je od 194 države koje su potpisale sporazum. Naravno, kao dio Europske unije, Hrvatska je i prije započela s mjerama koje imaju za cilj smanjenje emisija stakleničkih plinova. Temelj tih mjera je povećanje energetske učinkovitosti i udjela energije dobivene iz obnovljivih izvora energije (OIE). Hrvatska već sada ispunjava cilj o udjelu OIE u ukupnoj potrošnji. Prvenstveno zbog proizvodnje električne energije iz velikih hidroelektrana, korištenja biomase u kućanstvima za grijanje, ali i zbog uvoza električne energije [2].

Iako se zadnjih godina u Hrvatskoj vide pomaci u iskorištavanju OIE, energetski potencijal sunca, vjetra, geotermalnih izvora i biomase (biomasa se trenutno u većini slučajeva ne iskorištava učinkovito) je i dalje većinom neiskorišten. Razlog tomu su i dalje mala educiranost stanovništva o prednostima koje im pružaju OIE, visoki investicijski troškovi i niske cijene toplinske i električne energije zbog čega je period povrat uloženog kapitala dug.

Ukupno 2,496.928 hektara Republike Hrvatske pokriveno je šumom [3] što ukazuje na visoki potencijal biomase. Biomasa, u obliku ogrjevnog drva, već se tradicionalno koristi za proizvodnju toplinske energije u kućanstvima. Zbog toga što je to drvo profitabilnije pretvoriti u neki proizvod, nego li ga iskorištavati kao energent [4], potrebno je ulagati u toplinske elektrane koje će iskorištavati drvene otpatke.

Kogeneracijska postrojenja imaju veći stupanj efikasnosti od odvojene proizvodnje električne i toplinske energije. Tu toplinsku energiju moguće je koristiti i za grijanje objekata pomoću centraliziranih toplinskih sustava (CTS). U Hrvatskoj postoji mali broj kogeneracijskih postrojenja jer izgradnja iziskuje velike investicijske troškove, a period povrata uložених sredstava relativno je dug. Kako bi se potaknuli pojedini subjekti na izgradnju visokoučinkovitih kogeneracija i elektrana na OIE donesen je Zakon o obnovljivim izvorima energije i visokoučinkovitoj kogeneraciji (ZOIEVUK) [5]. Zakon predviđa donošenje Uredbe o poticanju proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora energije i visokoučinkovitih kogeneracija [6] koja je trenutno u javnoj raspravi, a kojom se klasificiraju postrojenja za

dobivanje energije iz OIE te se ustrojava sustav poticanja proizvodnje električne energije iz takvih postrojenja. Uredba propisuje da veći proizvođač uz cijenu električne energije koju postižu na tržištu primaju i premiju koju osigurava zakonodavac, dok mala postrojenja ovom Uredbom i dalje ostaju u sustavu feed-in poticaja. Tržišna premija proizvođača ostavlja djelomično izloženog tržištu. Zbog upitne isplativosti i izloženosti tržištu izgradnju kogeneracijskih postrojenja treba pažljivo analizirati kako bi one u konačnici bile profitabilne.

U ovom radu će se analizirati izgradnja kogeneracijskog postrojenja uz postojeću tvornicu parketa i podnih obloga u Ogulinu te njegovo spajanje na postojeći CTS. Cilj je ispitati isplativost te investicije visokoučinkovitog korištenja biomase u sredini koja obiluje drvnom biomasom i koja ima velike potrebe za toplinskom energijom.

2. BIOMASA I NJEZINA PRIMJENA U ENERGETSKOM SEKTORU

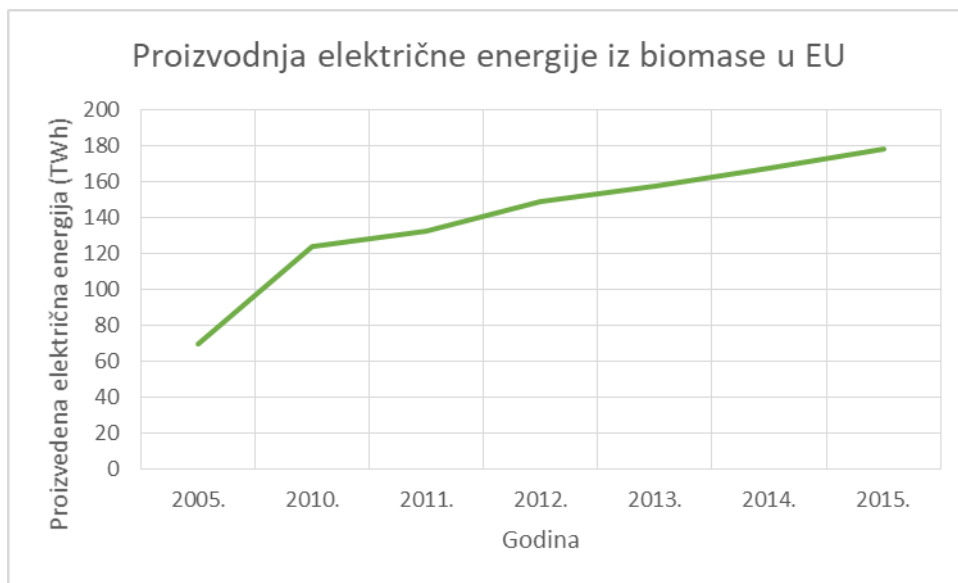
Biomasa je biorazgradivi dio proizvoda, otpada i ostataka iz poljoprivredne proizvodnje i šumarske industrije. Energija iz biomase dolazi u čvrstom, tekućem i plinovitom stanju. Smatra se obnovljivim izvorom energije jer je neutralna u odnosu na emisije CO₂. To znači da je ukupno proizvedena količina CO₂ tijekom izgaranja biomase jednaka količini CO₂ koju su biljke apsorbirale tijekom procesa fotosinteze što prikazuje Slika 1. Uz to, velika pažnja mora se pridati proizvodnji biomase koje bi trebalo biti održivo, odnosno da su sječa i prirast drvene mase u održivim razmjerima kako bi ona uistinu bila obnovljivi izvor energije.



Slika 1. Kružni tok CO₂ u prirodi posredstvom biomase [7]

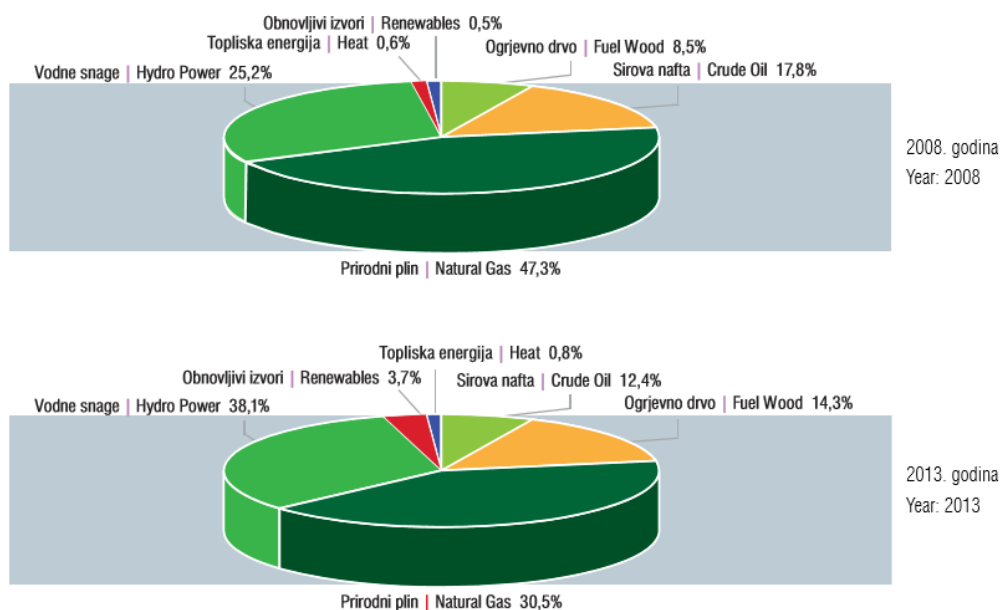
Biomasa se dijeli na: drvenu biomasu, nedrvnu biomasu, bioplin, alkoholna goriva (etanol), biodizel, otpad i deponijski plin [8].

U Europskoj uniji biomasa je jedan od najvažnijih obnovljivih izvora energije te se očekuje porast njezina udjela u primarnoj proizvodnji energije s 15% na 22% do 2050. [9]. Europska unija potiče korištenje biomase i to na učinkovit način, istovremenom proizvodnjom toplinske i električne energije. Tako prema podacima, dobivenih 69,6 TWh električne energije iz biomase u 2005., raste na 177,9 TWh u 2016. godini što prikazuje Slika 2.



Slika 2. Proizvodnja električne energije iz biomase u EU [10]

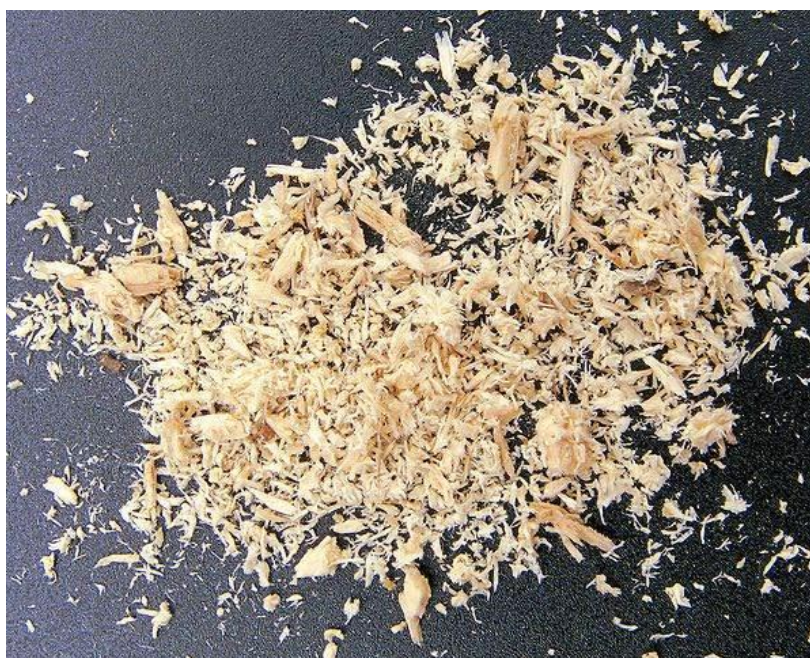
Prema podacima iz 2013. godine udio energije dobivene iz biomase, iz ogrjevnog drva, u Hrvatskoj iznosi 14,3% od ukupno dobivene energije kao što prikazuje Slika 3. To ukazuje na veliku zastupljenost biomase, ali njezin potencijal u Hrvatskoj nije iskorišten u dovoljnoj mjeri, a ono što se koristi većinom je na nedovoljno učinkovit način. U Hrvatskoj se očekuje nastavak trenda rasta potrošnje biomase te se tako procjenjuje da će uporaba biomase porasti na 26 PJ do 2020. godine [9].



Slika 3. Udjeli u proizvodnji primarne energije u RH 2008. i 2013. [2]

2.1. Drvna biomasa

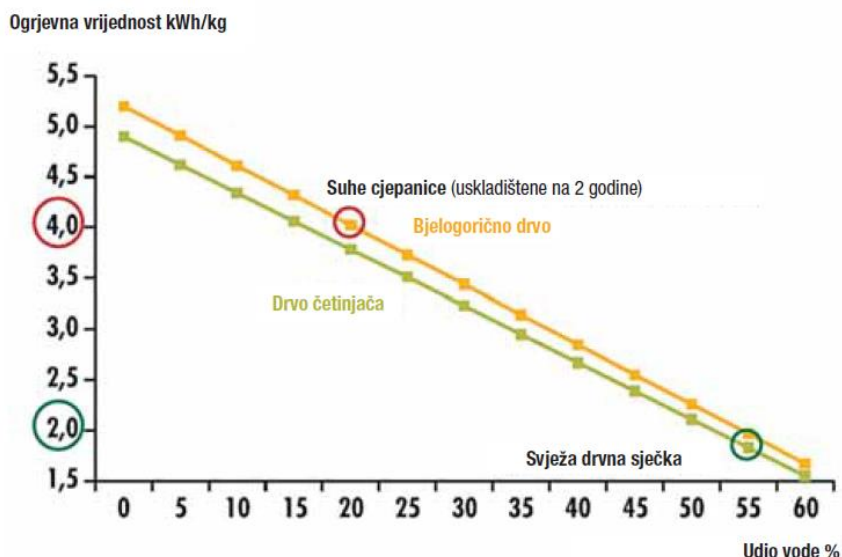
Drvna biomasa ima predvidljivije kretanje cijena, nego što to imaju nafta ili zemni plin. Lako se skladišti i ima relativno dobru površinsku distribuciju i gustoću kada je Hrvatska u pitanju. U nju ubrajamo biomasu koja je dobavljena direktno iz šume i biomasu koja je nastala u nekom od procesa u drвноj industriji. Osnovni proizvodi dobiveni iz drvne biomase javljaju se u obliku cjepanica, drvne sječke, piljevine te briketa i peleta koji nastaju prešanjem usitnjene drvne biomase. U drвноj industriji, prilikom obrade drva, gubi se 30%-40% osnovne sirovine, dok se za proizvodnju parketa taj iznos penje do 65% [8]. Oblik, kvaliteta i veličina drvnih ostataka dobivenih obradom drva u drвноj industriji variraju zbog: tehnološkog procesa kojim se obrađuje drvo, veličine i vrste trupaca koji se obrađuju, namjene i vrste finalnog proizvoda te o stručnosti radnika koji obrađuju drvo. Drvni ostaci su o obliku piljevine, komadića drva, odrezaka i kore, a dobiveni su nekim od procesa piljenja, brušenja, blanjanja itd. Slika 4. prikazuje drvne ostatke koji su nastali prilikom proizvodnje u drвноj industriji.



Slika 4. Drvni ostaci nastali obradom u drвноj industriji [11]

U drвноj industriji, u malim postrojenjima, ti ostaci se uglavnom ne iskorištavaju. Velika postrojenja koriste drvni otpad za proizvodnju toplinske energije u sušarama, a dio tih velikih postrojenja ih prerađuje kako bi dobili drvne pelete, brikete itd. koje dalje prodaju [11].

Osnovne karakteristike drvene biomase, koje utječu na kvalitetu goriva su: kemijski sastav, ogrjevna vrijednost, temperatura samozapaljenja, temperatura izgaranja te vlažnost i gustoća. Na najvažniju karakteristiku drvene biomase, njenu ogrjevnju vrijednost, najviše utječe vlažnost kao što to prikazuje Slika 5. (povećanje vlažnosti uzrokuje smanjenje ogrjevnje vrijednosti).



Slika 5. Utjecaj vlažnosti na ogrjevnju vrijednost [12]

2.1.1. Drvna sječka

Sječka, koju prikazuje Slika 6., je ogrjevno drvo koje je usitnjeno na komadiće veličine nekoliko centimetara. U iznimnim slučajevima može biti veličine do desetak centimetara. Najčešće se proizvodi pomoću iverača od niskokvalitetne vrste drva kao što su grane i krošnje. Drugi način dobivanja sječke je u drvnoj industriji gdje se dobiva kao nusproizvod, a naziva se tvornička drva sječka. Zbog slabe kvalitete drva od kojeg nastaje najčešće ima nisku gustoću energije.



Slika 6. Drvna sječka [12]

Skladištenje je jedan od problema koji se veže za drvenu sječku jer zbog rasutosti zahtijeva dvostruko više skladišnog prostora, nego cjepanice. Ako se skladišti sječka s visokim udjelom vlažnosti, preko 50%, treba paziti da se na njoj ne stvara plijesan. Lako se distribuira iz skladišta kompresorima i vakuum pumpama. Slika 7. prikazuje jedan skladišni prostor drvene sječke. Drvena sječka koristi se u potpuno automatiziranim kotlovima što pruža isti komfor i praktičnost kao kod upotrebe fosilnih goriva.

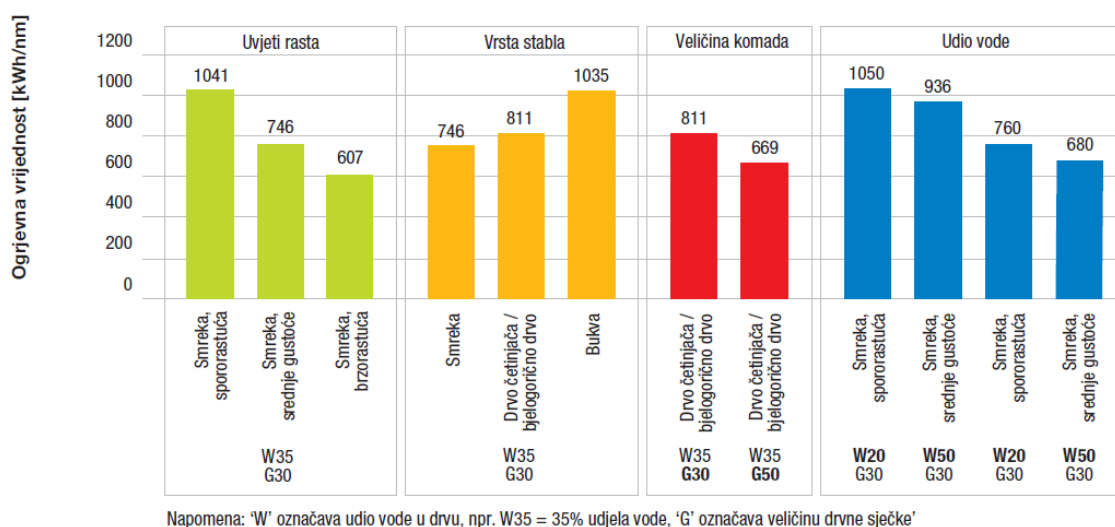


**Slika 7. Primjer skladišta drvene sječke konstruiranog u tvrtki
INGENIEURBÜRO DANNENBERG GmbH & Co. KG [13]**

Prodaje se po nasipnom metru-nm ($1 \text{ m}^3=2,5 \text{ nm}$), a udio topline dobivene iz nazivnog metra ovisi o vrsti drveta i vlažnosti i iznosi od 630 kW do 1.100 kW. Najčešće se na tržištu prodaje drvena sječka koja je mješavina sječki više vrsta drva, a sječka samo jedne vrste drva je rijetkost. Iz tog razloga se cijenu drvene sječke određuje iz težine i količine vlage, a ne po vrsti sječke.

Drvena sječka najčešće se koristi u većim sustavima grijanja na biomasu kapaciteta 1 MW, a u toplanama malih i srednjih kapaciteta ne toliko često. U slučaju malih i srednjih toplana sječka mora biti suha i visokokvalitetna. Udio vlage ne smije prelaziti 30% jer inače dolazi do zagušenja sustava i stvaranja čađe. Postrojenja većih kapaciteta mogu koristiti sječku slabije kvalitete što znači da sječka može dolaziti direktno iz šume i da može sadržavati velike udjele zelenog drva i kore. Korištenje sječke slabije kvalitete omogućeno je u velikim postrojenjima jer su, za razliku od manjih postrojenja, opremljena sustavima prerade i kondenzacije dimnih plinova što omogućuje manje emisije štetnih plinova i korisno sagorijevanje te niskokvalitetne biomase.

Velicina i oblik sječke vrlo su bitni zbog transporta sustavima kompresora i pumpi. Sječka je podijeljena u nekoliko skupina s obzirom na veličinu: fina drvena sječka za male sustave (G30), drvena sječka srednje veličine (nastala u pilanama) koja se koristi u većim postrojenjima (G50) te sirova drvena sječka (G100) koja se koristi u velikim tvorničkim postrojenjima. Klasifikacija po veličine vrši se prema austrijskoj normi ÖNORM M 7133 [12]. Slovo G označava da se klasifikacija vrši prema veličini drvene sječke (postoji klasifikacija prema udjelu vlage W, gustoći drvene sječke S i udjelu pepela A), brojka nakon slova G označava površinu jedne čestice drvene sječke pomnoženu s 10 [14]. Slika 8 prikazuje ogrjevnu vrijednost drvene sječke u ovisnosti o različitim parametrima.

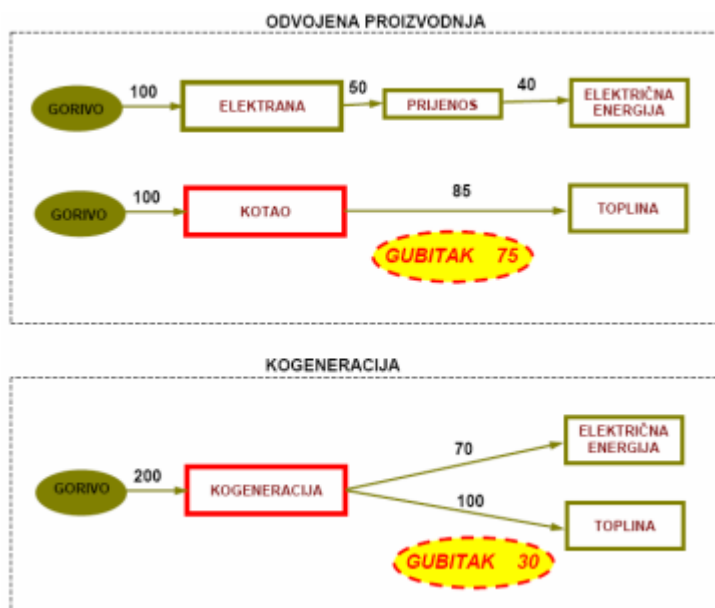


Slika 8. Ogrjevna vrijednost drvene sječke s obzirom na uvjete rasta, vrstu stabla, veličinu komada i udio vode [12]

2.2. Kogeneracijska postrojenja na biomasu

Kogeneracijska postrojenja su postrojenja u kojima se istovremeno proizvodi korisna toplinska i električna energija. Kemijska energija, koja se dobiva iz biomase, pretvara se u mehaničku i toplinsku energiju. Daljnjom pretvorbom mehanička energija pretvara se u električnu energiju, a toplinska služi za proizvodnju pare, zagrijane vode ili zraka. Kogeneracijska postrojenja grade se tamo gdje postoji potreba za oba oblika energije, odnosno pokraj različitih industrijskih postrojenja, centraliziranih toplinskih sustava i pokraj objekata javne namjene.

U usporedbi s odvojenom proizvodnjom električne i toplinske energije, za istu potrošnju primarne energije, kogeneracijsko postrojenje proizvodi i do 40% više toplinske i električne energije kao što to prikazuje Slika 9.



Slika 9. Usporedba gubitaka u odvojenoj i kogeneracijskog proizvodnji energije [15]

Veličine kogeneracijskog postrojenja mogu varirati i ovisiti o potrebi za električnom i toplinskom energijom te o dostupnosti energenta, biomase. Podjela kogeneracijskih postrojenja s obzirom na veličinu [16]:

- Mikro-kogeneracije (≤ 50 kW),
- Male kogeneracije (50 kW-1.000 kW),
- Srednje kogeneracije (1.000 kW-35.000 kW),
- Velike kogeneracije (≥ 35.000 kW).

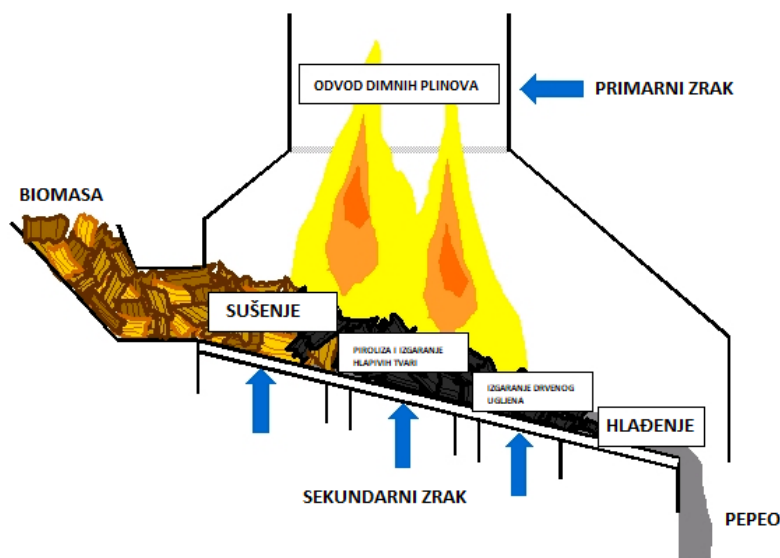
2.2.1. Dobivanje energije iz biomase

Izgaranje biomase u generatoru pare izvodi se jednim od konvencionalnih načina izgaranja, na rešetki ili u fluidiziranom sloju, ili rasplinjavanjem biomase. Najčešće se u postrojenjima koja su manjih snaga sagorijeva samo biomasa dok se kod velikih postrojenja istovremeno spaljuje biomasa s nekim od fosilnih goriva. Zakonodavstvo potiče izgradnju kogeneracijskih postrojenja koja koriste samo biomasu jer je ona obnovljivi izvor energije.

2.2.1.1. Izgaranje biomase

Biomasa najčešće izgara u nepokretnom ložištu s rešetkom, u mjehuričastom fluidiziranom sloju ili u cirkulirajućem fluidiziranom sloju.

Izgaranje na rešetki je razvijena i tržišno zrela tehnologija koju prikazuje Slika 10. Omogućeno je izgaranje svih oblika biomase (od piljevine do komada biomase), biomase s različitim udjelima vlage, različitom kvalitetom i udjelom pepela. Proces izgaranja je kvalitetniji što je biomasa homogenije raspoređena po rešetki i što je dovodjenje zraka za izgaranje ujednačenije. Gorivo se dovodi gornjim ili donjim dovodom. Donji dovod je namijenjen za postrojenja manjih snaga kao i za postrojenja koja koriste drvenu sječku i piljevinu s manjim udjelom pepela. Kod većih sustava, i onih sustava koji zahtijevaju efikasnije odvođenje pepela, koristi se gornji dovod goriva.

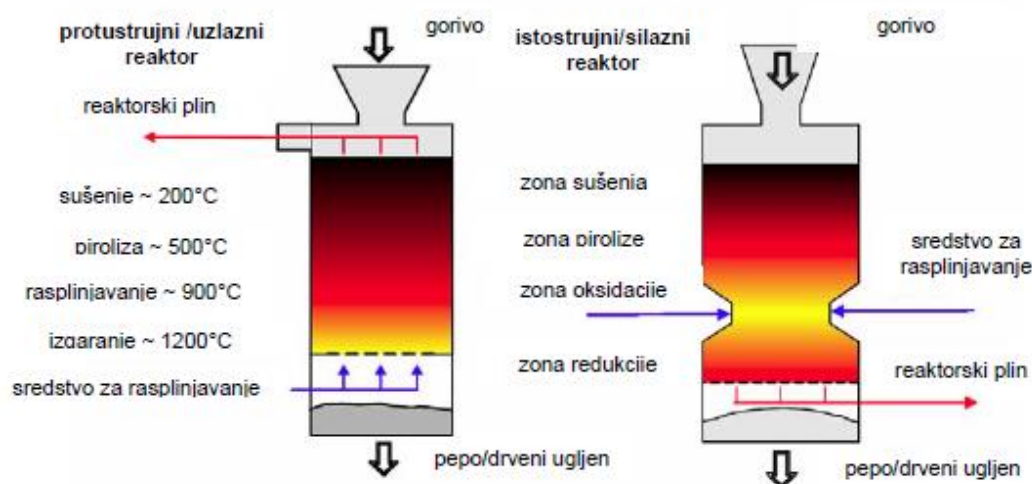


Slika 10. Izgaranje biomase na kosoj rešetki [17]

Izgaranje u mjehuričasto fluidiziranom sloju koristi se kod postrojenja snaga većih od 10 MWt. Na dnu ložišta nalazi se silikatni pijesak ispod kojeg se upuhuje primarni zrak brzine od oko 2 m/s. Sekundarni zrak dovodi se iz gornjeg dijela ložišta. Povećanjem brzine primarnog zraka između 5 i 10 m/s i smanjenjem veličine zrnca pijeska omogućuje se stvaranje cirkulirajućeg sloja. Zrnca pijeska uzdižu se s dimnim plinovima pritom stvarajući ciklon, nakon čega se ponovno vraćaju u sloj. Izgaranje u mjehuričastom i cirkulirajućem fluidiziranom sloju omogućuju homogenije izgaranje što smanjuje proizvodnju štetnih plinova i povećava učinkovitost [15].

2.2.1.2. Rasplinjavanje biomase

Rasplinjavanje je alternativa konvencionalnom izgaranju biomase. Nema status komercijalne tehnologije jer je još u razvoju. Tim procesom se kruta biomasa pretvara u reaktorski plin koji se koristi za pogon plinske turbine, motora ili gorivih članaka. Plin se sastoji od ugljičnog monoksida, vodika, metana, a sadrži i male količine etana i propana. Faze rasplinjavanja su: sušenje goriva, piroliza, oksidacija i redukcija. U kogeneracijskim postrojenjima na biomasu najčešće se koriste istostrujni i protustrujni reaktori s rasplinjavanjem na nepokretnoj rešetki koje prikazuje Slika 11.



Slika 11. Shema protustrujnog i istostrujnog reaktora [15]

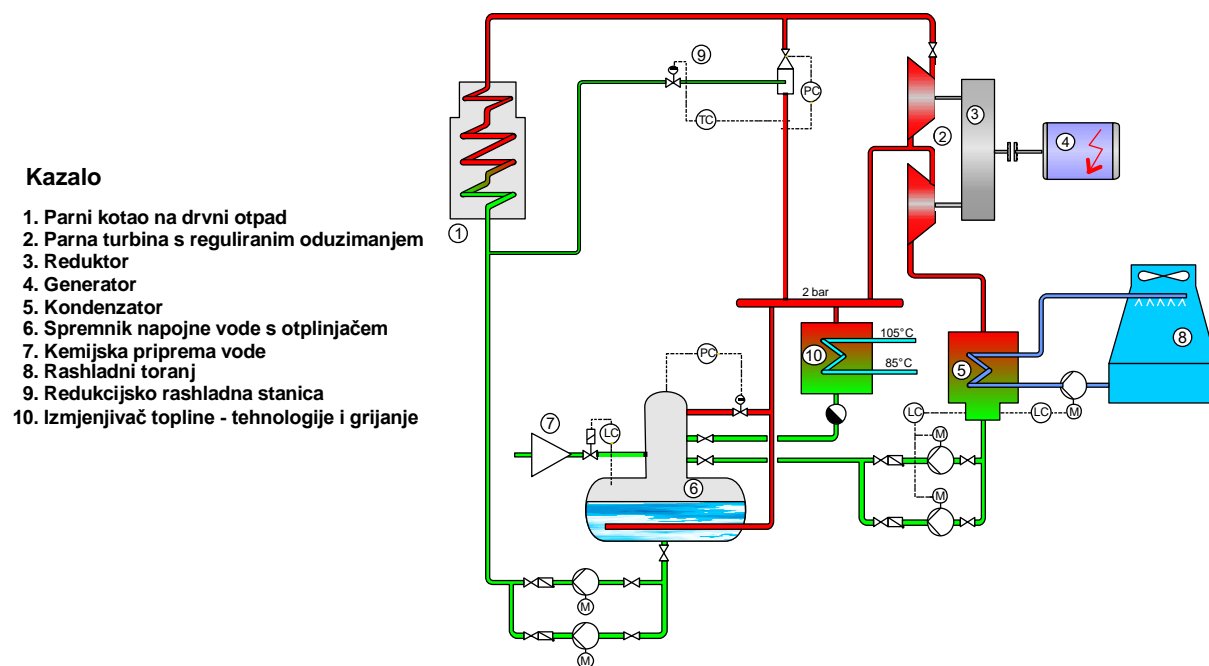
2.2.2. Tehnološki proces u kogeneraciji

Pored podjele s obzirom na način pretvorbe kemijske energije u toplinsku energiju u generatoru pare imamo i podjelu kogeneracijskih postrojenja s obzirom na tehnološki proces u kojem se dobiva električna i toplinska energija za potrošače. Karakteristike koje obilježavaju sve ove procese je niska električna iskoristivost i obrnuta proporcionalnost specifičnih investicijskih troškova i nazivne snage postrojenja [15].

2.2.2.1. Postrojenja s Rankineovim kružnim procesom

Većina današnjih kogeneracijskih postrojenja temelji se na Rankineovom kružnom procesu s pregrijanom vodenom parom. Proces kreće tako da voda isparava te se nastala para pregrijava u generatoru pare. Pregrijana para potom expandira u turbini. Nakon turbine para kondenzira u izmjenjivaču (za pokrivanje toplinskih potreba potrošača) ili u kondenzatoru. Stanje pare na

izlazu iz turbine određeno je razinom toplinske potrošnje kod potrošača. U trenucima kada nema potrebe za toplinskom energijom para u turbini ekspandira do najnižeg mogućeg tlaka pritom proizvodeći samo električnu energiju. Kada potrebe za toplinskom energijom porastu ekspandirat će do stanja koje će biti na višem tlaku koji ovisi o potrebnoj temperaturi vode kod potrošača ili o industrijskim zahtjevima. Shemu jednog kogeneracijskog postrojenja zasnovanog na Rankineovom procesu s pregrijanom vodenom parom prikazuje Slika 12.



Slika 12. Shema kogeneracijskog postrojenja osnovanog na Rankineovom kružnom procesu [18]

2.2.2.2. Korištenje plinskih i parnih motora

Nakon što su svoje mjesto ustupili efikasnijim i ekonomski povoljnijim parnim turbinama, parni motori se sve više vraćaju u uporabu jer njihova veličina i snaga omogućavaju izvedbu malih kogeneracijskih postrojenja. Proces dobivanja korisne energije teče jednako kao u procesima s parnom turbinom. Jedina razlika je postojanje parnog motora umjesto parne turbine.

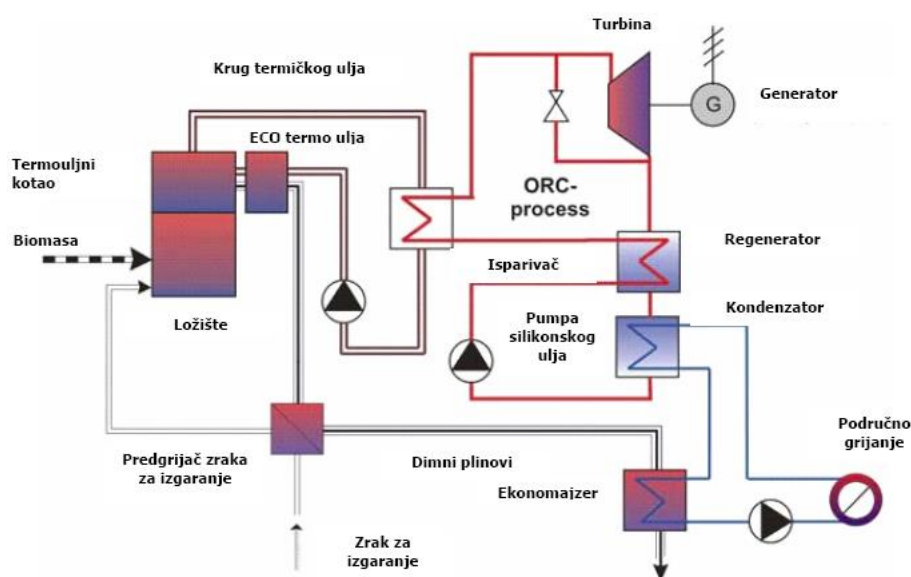
Upotreba plinskih motora, koji su pogonjeni produktima nastalim rasplinjavanjem biomase, nije toliko značajna usprkos dobroj električnoj iskoristivosti. Razlog tomu je izrazito nepovoljan sastav reaktorskog plina, niska ogrjevna vrijednost tog plina (60% manja ogrjevna vrijednost od one prirodnog plina), ali i štetne tvari koje se ispuštaju rasplinjavanjem. Te štetne tvari trebaju se ukloniti kako ne bi dospjele u okoliš, a za to je potrebna dodatna oprema koja povećava investicijske troškove. Toplina ispušnih plinova služi za pokrivanje toplinskih potreba potrošača.

2.2.2.3. Postrojenja s plinskim turbinama s indirektnim izgaranjem

Glavna razlika plinske turbine s indirektnim izgaranjem i obične plinske turbine je izgaranje goriva, koje je u ovom slučaju odvojeno od radnog fluida. Umjesto komore izgaranja, ovakva postrojenja imaju izmjenjivač topline u kojem se toplina dobivena izgaranjem biomase predaje radnom mediju, najčešće zraku. Procesi s plinskom turbinom podijeljeni su na one s otvorenim ili zatvorenim ciklusom. Zatvoreni ciklus ima višu ukupnu iskoristivost jer se razina tlaka u ciklusu održava na višim vrijednostima (što smanjuje specifični volumen i potrebnu veličinu postrojenja), dok kod otvorenog ciklusa imamo bolju električnu iskoristivost jer se ekspanzija vrši do tlaka koji je vrlo blizak okolišnjem tlaku. Nakon turbine radni medij predaje toplinu za grijanje u izmjenjivaču i zatim se ponovno vraća u kompresor.

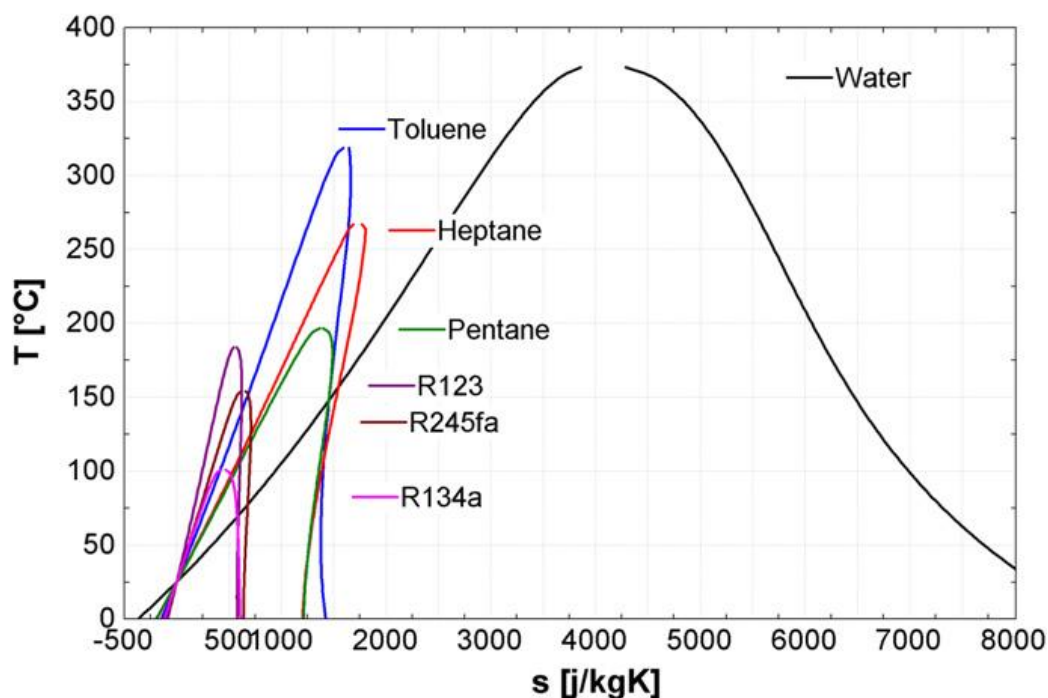
2.2.2.4. Organski Rankineov ciklus (ORC)

Organski Rankineov ciklus je varijacija Rankineovog ciklusa s pregrijanom parom, samo što u ovom procesu ulogu radnog medija preuzima organski fluid (silikonsko ulje, amonijak, izopentan ili izooktan). Toplina dobivena izgaranjem biomase predaje se termičkom ulju koje se koristi kao posrednik u predaji topline organskom mediju. Temperatura ulja održava se u rasponu od 250°C do 300°C [19]. Ulje predaje toplinu organskom mediju prilikom čega medij isparava. Nakon toga medij ekspandira u turbini koja se vrti vrlo malim brzinama što smanjuje mehaničke gubitke. U kondenzatoru organski medij predaje toplinu vodi za sustave grijanja, poslije čega odlazi natrag u izmjenjivač gdje mu termičko ulje opet predaje toplinu i proces kreće ispočetka. Shematski prikaz jednog ORC postrojenja prikazuje Slika 13.



Slika 13. Shematski prikaz ORC postrojenja [15]

Prva u nizu prednosti ORC postrojenja u usporedbi s postrojenjima s konvencionalnim Rankineovim ciklusom je ta da organski medij nakon ekspanzije u turbine ostaje u stanju pregrijane pare, to omogućuje negativan nagib krivulje zasićenja suhozasićene pare. Iz tog razloga nema potrebe pregrijavati organski medij prije ulaska u turbinu kao što je to slučaj kod procesa s vodenom parom. Druga prednost je ta da se energetske transformacije odvijaju na nižim temperaturnim razinama što omogućuje niža točka isparavanja organskog medija. Nadalje, korištenje termičkog ulja, koje je na nižim tlakovima nego voda, produžuje životni vijek samog postrojenja. Općenito, niži parametri radnog medija u usporedbi s vodom omogućuju da postrojenje bude manje kompleksno. Ovakva postrojenja najčešće su snaga od 200 kWe do preko 2.000 kWe [18]. Električna iskoristivost im je od 10 do 15%, dok se ukupna iskoristivost postrojenja penje do 88% [19]. Nedostaci ovih postrojenja su: visoki investicijski troškovi jer ova tehnologija nije dostigla tržišnu zrelost, laka zapaljivost silikonskog ulja i opasnost od propuštanja vrelog ulja. Zbog manje razlike između entropije suhozasićene pare i vrele kapljevine organskog medija entalpija isparavanja je manja što smanjuje učin ORC-a u usporedbi s Rankineovim procesom s pregrijanom parom. T,s-dijagram različitih organskim medija i vode prikazuje Slika 14.



Slika 14. T,s-dijagram vode i različitih organskih medija [19]

Kako bi se postigao isti učin kao kod konvencionalnih procesa protok fluida mora biti veći zbog čega se povećava potrošnja energije na pumpi. Pregled svih razlika između ORC-a i Rankineova ciklusa s vodenom parom prikazuje Tablica 1.

Tablica 1. Razlike između ORC-a i Rankineova procesa s vodenom parom [19] [20] [21]

ORC	Rankineov proces s vodenom parom
Nema potrebe za pregrijavanja medija	Visok stupanj iskoristivosti
Niže temperature medija na ulazu u turbinu	Jeftin radni medij
Manji tlak isparavanja	Ekološki prihvatljiv radnim medij
Viši tlak kondenzacije	Bezopasan radni medij
Nema postrojenja za pripremu vode	Manje potrošnja energije pumpe
Jednostavna konstrukcija turbine	Kemijski stabilan radni medij

2.2.3. Kogeneracija u Hrvatskoj

Tijekom proteklih godina u Hrvatskoj je postojao trend povećanja potrebe za električnom i toplinskom energijom, a očekuje se da će se taj trend nastaviti i u idućim godinama. Kogeneracijska postrojenja imaju potencijal da zadovolje dio tih potreba, osobito kada je industrija u pitanju, ali i tamo gdje je moguće spajanje kogeneracijskog postrojenja na centralizirani toplinski sustav (CTS) [22]. Iz tog razloga Vlada Republike Hrvatske i Ministarstvo zaštite okoliša i energetike pokušavaju olakšati proces dobivanja statusa povlaštenog proizvođača električne energije i jasno definirati uvjete tko to može postati [23]. U Hrvatskoj, na kraju 2018. godine, postojalo je šest kogeneracijskih postrojenja. Izgradnja novih postrojenja nije bila u planu što se može vidjeti iz mjesečnog izvještaja Hrvatskog regulatora tržišta energije (HROTE) [24]. Isti podaci mogu se pronaći i u Registru OIEKPP (Registar projekata i postrojenja za korištenje obnovljivih izvora energije i kogeneracije) [25]. Pregled postojećih i planiranih postrojenja koji koriste OIE te njihove ukupne instalirane snage prikazuje Tablica 2.

Tablica 2. Broj povlaštenih proizvođača i nositelja projekata za pojedini OIE te njihova snaga

Tehnologija	Povlašteni proizvođači (br. elektrana)	Povlašteni proizvođači instalirana snaga (kW)	Nositelji projekta (br. elektrana)	Nositelji projekta instalirana snaga (kW)
Vjetroelektrane	22	567.000	5	162.000
Sunčane elektrane	1.229	52.434	3	1.032
Hidroelektrane	13	5.785	3	934
Elektrane na biomasu	24	51.844	31	60.554
Elektrane na bioplin	36	39.733	12	14.187
Kogeneracijska postrojenja	6	113.293	0	0
Geotermalne elektrane	0	0	1	10.000
Elektrane na deponijski plin	1	3.000	0	0
Elektrane na plin iz postrojenja za pročišćavanje otpadnih voda	1	2.500	0	0
Ukupno	1.332	835.589	550	248.707

2.3. Centralizirani toplinski sustavi

Zadaća centraliziranih toplinskih sustava je opskrbljivanje potrošača potrebnom toplinskom energijom, a u nekim slučajevima i toplom vodom za korištenje u kućanstvu. Sve to, želi se ostvariti uz što veću toplinsku iskoristivost kako bi udio neiskorištene energije bio minimalan i kako bi se iskoristili svi lokalni izvorni energije koji bi u protivnom ostali neiskorišteni [26][27].

Osnovni elementi koji sačinjavaju CTS su: postrojenje koje proizvodi toplinsku energiju, distribucijski sustav toplinske energije i uređaji u kućanstvu koji služe za regulaciju.

Prednosti CTS-a: mogućnost spajanja raznih potrošača na mrežu, neovisno o njihovoj potrošnji; od potrošača zahtjeva malo prostora za ugradnju priključak na mrežu, što nije slučaj kada je potrošač ujedno i proizvođač toplinske energije; opskrbljivanje toplinskom energijom je kontinuirano te potrošač ne mora brinuti o tome ima li dovoljno toplinske energije za korištenje i ima li dovoljno energenta koji služi za proizvodnju energije; minimalni troškovi za potrošača jer najveći dio investicije, cjevovod i postrojenje, pokriva proizvođač; visoka efikasnost jer se koriste niskotemperaturni režimi vode u mreži što omogućuje iskorištavanje i lošijih energetskih izvora s manjom ogrjevnom vrijednosti, što kod pojedinačnih toplinskih izvora u kućanstvu nije slučaj; na sustav se mogu priključivati postrojenja pogonjena različitim izvorima topline što omogućava veliku pouzdanost i neovisnost o dostupnosti pojedinih izvora; postrojenja u kojima se proizvodi toplinska energija uglavnom su kogeneracije ili neka druga postrojenja na OIE; male emisije CO₂ [26].

Iako ima brojne prednosti, centralizirani toplinski sustavi iziskuju značajna investicijska sredstva. To je posebno izraženo u sredinama gdje ne postoji postojeća infrastruktura potrebna za distribuciju toplinske energije do potrošača. Stoga, u većini slučajeva gdje ne postoji dovoljna gustoća potrošača, ovakvi sustavi nisu isplativi. Što se tiče izvora energije za proizvodnju topline, iako su u većini slučajeva to OIE, postoje slučajevi gdje se topline dobiva iz fosilnih goriva što umanjuje pozitivne aspekte koje donosi izgradnja CTS-a.

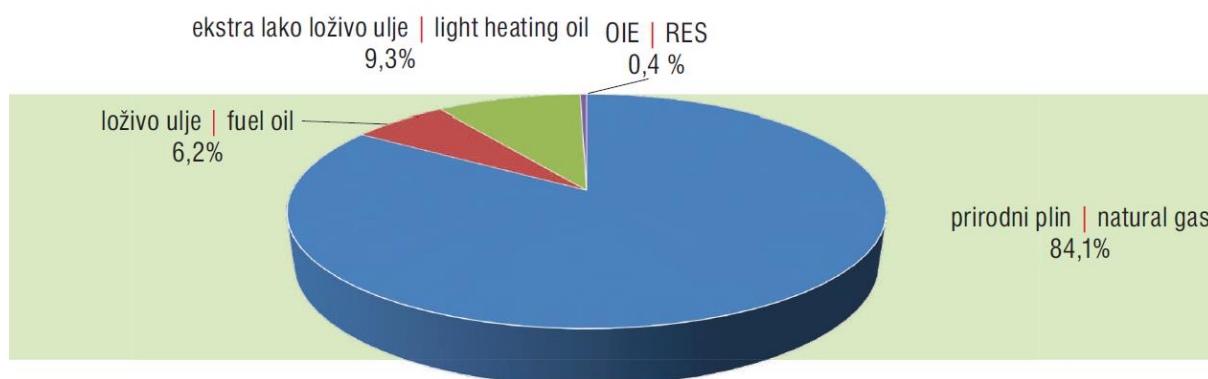
2.3.1. Centralizirani toplinski sustavi u Hrvatskoj

Razvoj centraliziranih toplinskih sustava u Republici Hrvatskoj počinje 1954. godine izgradnjom vrelovoda koji je spajao toplanu EL-TO i tvornicu Rade Končar u Zagrebu. U kasnijim godinama i grad Osijek počeo je s izgradnjom svojeg CTS-a [28]. Do danas, taj sustav se uvelike proširio te su i neki manji gradovi dobili svoje CTS-e i to tamo gdje je to financijski opravdano tj. gdje su broj potrošača i njihova gustoća raspodjele veliki. Distribucijski sustav u Zagrebu i Osijeku su dosta stari pa imaju dosta velike gubitke vode zbog puknuća na pojedinim dionicama cijevi. Drugi problem predstavljaju cijevi koje nisu predizolirane što uzrokuje velike toplinske gubitke. Upravo te predizolirane cijevi su uvjet da se u CTS-u može distribuirati niskotemperaturna voda s malim gubicima, što u konačnici rezultira mogućnošću uporabe obnovljivih izvora energije za pogon postrojenja za proizvodnju topline. Slika 15. prikazuje postojeće centralizirane toplinske sustave u Hrvatskoj.



Slika 15. Postojeći CTS-i u Republici Hrvatskoj [29]

U 2016. godini, u 16 gradova u Hrvatskoj, postojali su centralizirani toplinski sustavi. Na njih je ukupno bilo priključeno 158.647 potrošača, a isporučeno je ukupno 2,1 TWh toplinske energije [29]. Prema podacima, najveći dio toplinske energije dobiven je iz fosilnih goriva, dok je udio OIE u toj proizvodnji gotovo zanemariv. Slika 16. ilustrira to stanje.



Slika 16. Udio pojedinih izvora energije u dobivenoj toplini u CTS [29]

3. POTICANJE PROZVODNJE ELEKTRIČNE ENERGIJE TRŽIŠNOM PREMIJOM

Republika Hrvatska, još od 2007. godine, podupire proizvodnju električne energije iz OIE preko sustava poticaja zajamčenom otkupnom cijenom (*engl. feed-in tariff*). 2015. godine donosi se zakon kojim se s postojećeg sustava, zajamčene otkupne cijene, prelazi na sustav poticanja tržišnom premijom (*engl. feed-in premium*) kako bi se potaknulo proizvođače električne energije na prilagođavanje tržišnim uvjetima tj. da ih se potakne na proizvodnju električne energije onda kada je to najviše potrebno i kada će ostvariti najviše profita. Tržišna premija se isplaćuje povlaštenim proizvođačima električne energije za neto isporučenu električnu energiju. Zajamčenom otkupnom cijenom se i dalje potiče proizvodnja električne energije iz malih postrojenja do 30 kW. Zakon je propisao osnovne uvjete dobivanja poticaja, ali kvalitetna primjena zakona bila je onemogućena jer nije postojala Uredba kojom bi se detaljno klasificirala postrojenja koja mogu dobiti poticaje i kojom bi se razradila metodologija za izračun potrebnih varijabli koje služe za određivanje iznosa tržišne premije. Uredba je trenutno u javnoj raspravi i očekuje se njeno donošenje u 2019. godini kao nadopunu zakonu čije su zadnje izmjene napravljene 2018. godine.

Tržišna premija, za razliku od zajamčene otkupne cijene električne energije, ostavlja proizvođača električne energije djelomično izloženog tržištu. Proizvođač prodaje proizvedenu električnu energiju na tržištu, a Hrvatski operator tržišta energije (HROTE) mu povrh te postignute cijene isplaćuje tržišnu premiju koju utvrđuje na mjesečnu bazu. Tablica 3. prikazuje prednosti i nedostatke tržišne premije.

Tablica 3. Prednosti i nedostaci otkupa s tržišnom premijom [30]

Prednosti	Nedostaci
Prilagođavanje tržišnim cijenama	Potpuna izloženost tržištu u sustavu poticaja fiksnom tržišnom premijom
Prilagođavanje potražnji	Proizvođači električne energije iz sunčanih elektrana i vjetroelektrana teško mogu utjecati na vrijeme proizvodnje električne energije
Poticanje proizvodnje onda kada je potrebno najviše električne energije	

Postoji više vrsta tržišne premije. Sustav s promjenjivom tržišnom premijom, sustav s fiksnom premijom s gornjom i donjom granicom i sustav s fiksnom premijom. Prve dvije vrste tržišne premije ostavljaju proizvođača djelomično izloženog utjecaju tržišta, dok treći sustav poticanja tržišnom premijom ostavlja proizvođača u potpunosti izloženog tržištu. Usporedbu promjenjive i fiksne tržišne premije prikazuje Tablica 4., a vizualni prikaz različitih sustava poticaja prikazuje Slika 17. Republika Hrvatska ima sustav poticaja s promjenjivom tržišnom premijom.

Tablica 4. Usporedba fiksne i promjenjive tržišne premije [31]

Fiksna tržišna premija (tržišna cijena i fiksna premija)	Promjenjiva tržišna premija (porastom tržišne cijene opada premija i obratno)
Vrijeme visokih tržišnih cijena-velik profit	Nema mogućnosti ostvarenja velikih profita
Vrijeme niskih tržišnih cijena-mogući gubici	Uvođenje donje i gornje granice smanjuje rizik za potrošača i davatelja premije
Tržište ne uvjetuje iznos premije	Mora postojati sustav koji će regulirati cijenu kako tržišna cijena ne bi smanjila investicije u OIE
Velik profit u vrijeme visokih tržišnih cijena je kompenzacija za rizik tržišta	



Slika 17. Usporedba feed-in tariff poticaja s feed-in premium [32]

Da bi neko postrojenje konkuriralo za dobivanje poticaja tržišnom premijom ono najprije mora biti proglašeno povlaštenim proizvođačem električne energije. Osnovni preduvjeti za dobivanje statusa povlaštenog proizvođača električne energije su:

- u postrojenju, za dobivanje energije, treba se koristiti OIE, otpad ili se energija dobiva iz visokoučinkovite kogeneracije (visokoučinkovita kogeneracija-ono kogeneracijsko postrojenje u kojem se ostvaruje ušteda primarne energije od najmanje 10% u usporedbi s odvojenom proizvodnjom električne i toplinske energije, odnosno ostvarivanje bilo kakve uštede ako se radi o postrojenju koje je manje od 1 MW),
- postrojenje mora biti upisano u Registar OIEKPP i
- mora postojati priključak postrojenja na mrežu sa svim potrebnim mjernim uređajima kako bi se mogla vršiti kontrola isporuke električne energije.

Registar OIEKPP stvara HROTE, a status povlaštenog proizvođača električne energije odobrava Hrvatska energetska regulatorna agencija (HERA). Vlada Republike Hrvatske određuje kvote, u kilovatsatima, za poticanje proizvodnje električne energije. Svake godine HROTE objavljuje javni natječaj kojim se prikupljaju ponude za ostvarivanje prava na poticaj tržišnom premijom. Na natječaj se mogu prijaviti svi povlašteni proizvođači električne energije. Pravo na ostvarivanje poticaja ostvaraju ona postrojenja čija referentna vrijednost (RV), koja služi za izračun tržišne premije, ne prelazi maksimalni iznos referentne vrijednosti (RV_{max}) koji je objavljen u natječaju [6].

3.1. Metodologija izračuna iznosa tržišne premije

Iznos tržišne premije, koja se izračunava za svako postrojenje i to na mjesečnoj bazi, dobiva se prema izrazu (1):

$$TP_i = RV - TC_i \quad (1)$$

Pri čemu su:

TP_i – tržišna premija za svako pojedino proizvodno postrojenje ili proizvodnu jedinicu u obračunskom razdoblju [kn/kWh]

RV – referentna vrijednost električne energije utvrđena ugovorom o tržišnoj premiji [kn/kWh]

TC_i – referentna tržišna cijena električne energije u obračunskom razdoblju [kn/kWh]

Za svako proizvodno postrojenje izračunava se referentna vrijednost koja služi za mjesečni izračun tržišne premije. Referentna vrijednost jednaka je proizvodnim troškovima (PT). Izračun proizvodnih troškova za kogeneracijsko postrojenje na biomasu jednak je izrazu (2):

$$PT = T_{inv} + T_{op} \quad (2)$$

Pri čemu su:

PT – proizvodni troškovi [kn/kWh]

T_{inv} – investicijski troškovi [kn/kWh]

T_{op} – operativni troškovi (bez troškova goriva) [kn/kWh]

Investicijski troškovi obuhvaćaju: troškove razvoja projekta, troškove nabave zemljišta i građevinskih radova, nabavu opreme i priključka na javnu energetska itd. Izračun investicijskih troškova jednak je izrazu (3):

$$T_{inv} = \frac{Inv}{flh} \cdot \frac{WACC \cdot (1 + WACC)^n}{(1 + WACC)^n - 1} \quad (3)$$

Pri čemu su:

T_{inv} – investicijski troškovi [kn/kWh]

Inv – ukupni investicijski troškovi po jedinici instalirane snage [kn/kW]

flh – godišnji ekvivalentni sati rada proizvodnog postrojenja [h]

$WACC$ – ponderirana prosječna stopa povrata na kapital [%]

n – vrijeme trajanje ugovora o premiji [god]

Izračun ponderirane prosječne stope povrata kapitala jednak je izrazu (4):

$$WACC = eq \cdot roe + (1 - eq) \cdot r \quad (4)$$

Pri čemu su:

$WACC$ – ponderirana prosječna stopa povrata na kapital [%]

eq – udio vlastitog financiranja u investicijskim troškovima [%]

roe – tražena stopa povrata na vlastito ulaganje roe [%]

r – kamatna stopa na pozajmljena sredstva r [%]

Operativni troškovi obuhvaćaju: troškove održavanja i upravljanja pogonom, troškove plaća zaposlenih, troškove održavanja opreme te usluga potrebnih za rad proizvodnih postrojenja itd. Izračun operativni troškovi (bez troškova goriva) jednak je izrazu (5):

$$T_{op} = \frac{O_p}{flh} \quad (5)$$

Pri čemu su:

T_{op} – operativni troškovi (bez troškova goriva) [kn/kWh]

O_p – ukupni godišnji operativni troškovi (bez troškova goriva) po jedinici instalirane snage [kn/kW]

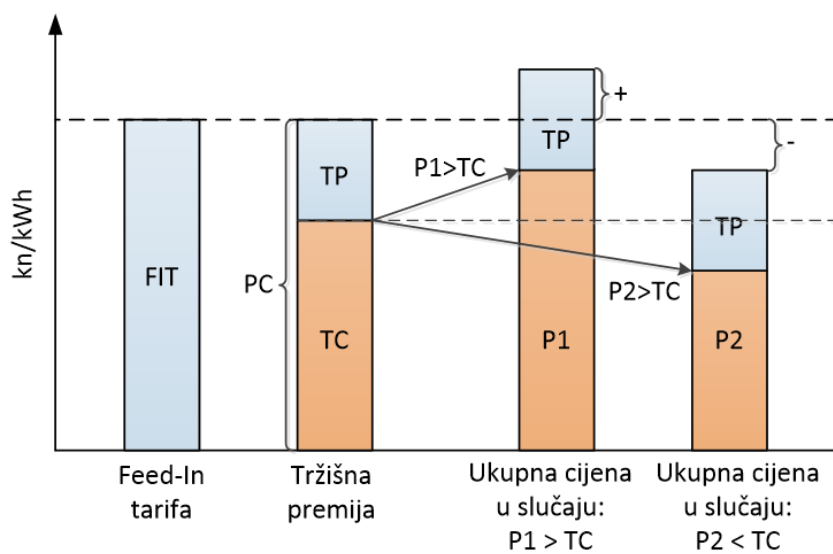
flh – godišnji ekvivalentni sati rada proizvodnog postrojenja [h]

HROTE izračunava RV_{max} na temelju uprosječenih rezultata i preporučenih vrijednosti iz stručne literature, a povlašteni proizvođači računaju vlastiti RV koji služi za obračunavanje tržišne premije. Natječaj zadovoljavaju ona postrojenja koja imaju RV manji ili jednak RV_{max} .

Referentne tržišne cijene CT_i na mjesečnoj bazi, također određuje HROTE. Ta vrijednost dobije se pomoću referentne satne dan unaprijed cijene električne energije za obračunski interval. Za njen izračun uzete su satne dan unaprijed cijene električne energije na hrvatskoj burzi električne energije CROPEX, satne dan unaprijed cijene električne energije na regionalnoj burzi električne energije BSP, satne dan unaprijed cijene električne energije na mađarskoj burzi električne energije HUPX kao i ukupni volumeni električne energije s kojima se trgovalo na tim burzama u određenom periodu [6]. Zbog korištenja srednjih vrijednost za izračun referentnih tržišnih vrijednosti mogu se javiti slučajevi da proizvođač dobije više, a nekada i manje sredstava, nego u sustavu sa zajamčenom otkupnom cijenom. To se događa jer prosječna vrijednost ne prati najvjernije stvarne rezultate. To prikazuje Slika 18.

Sredstva namijenjena za poticanje tržišnom premijom dobivaju se od [33]:

- naknade za poticanje OIEiVUK koju plaćaju krajnji kupci i
- prodaje električne energije preuzete od postrojenja u postojećem feed-in tariff sustavu, a koju na tržištu prodaje HROTE.



TC – Srednja tržišna cijena u promatranom periodu
 TP – Tržišna premija za promatrani period
 PC – Proizvodna cijena
 P1 – Prodajna cijena 1
 P2 – Prodajna cijena 2

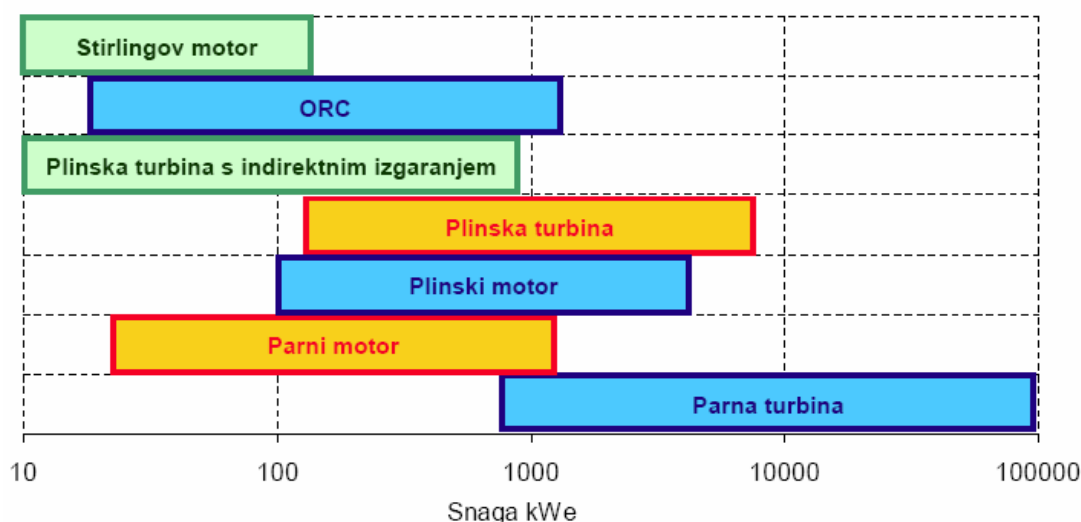
Slika 18. Mogući slučajevi s tržišnom premijom u usporedbi s feed-in tarifom [33]

4. METODA

Metoda prikazuje na koji način je odabrano i dimenzionirano planirano kogeneracijsko postrojenje. To predstavlja tehnički dio analize. Sačinjava je i ekonomski dio analize koji služi za ocjenjivanje isplativosti pojedinog projekta.

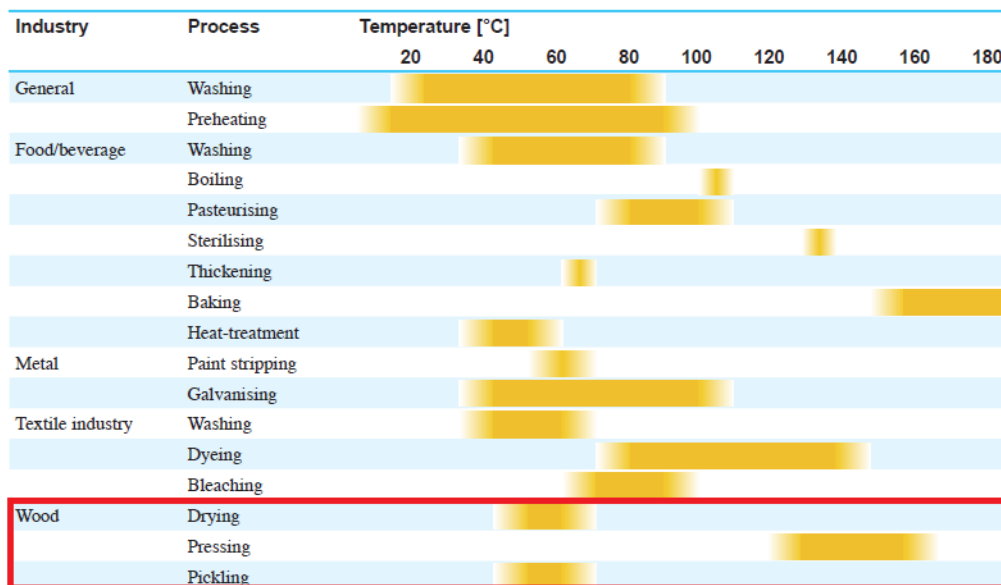
4.1. Tehnički proračun postrojenja

Odabir tehnologije, koja će se koristiti u postrojenju, najveći dijelom uvjetovan je potrebom za toplinskom i električnom energijom, ali i razvijenošću, dostupnošću i cijenom same tehnologije. Stoga, nakon što su uzeti u obzir svi parametri, uzet je ORC modul kao najbolje rješenje. Nazivna snaga modula odabrana je kako bi se zadovoljile ili vršne toplinske potrebe postrojenja ili potrebe postrojenja za baznim električnim opterećenjem. Preporučenu tehnologiju s obzirom na električnu snagu postrojenja prikazuje Slika 19.



Slika 19. Tehnologija koja se koristi pri određenim nazivnim snagama [15]

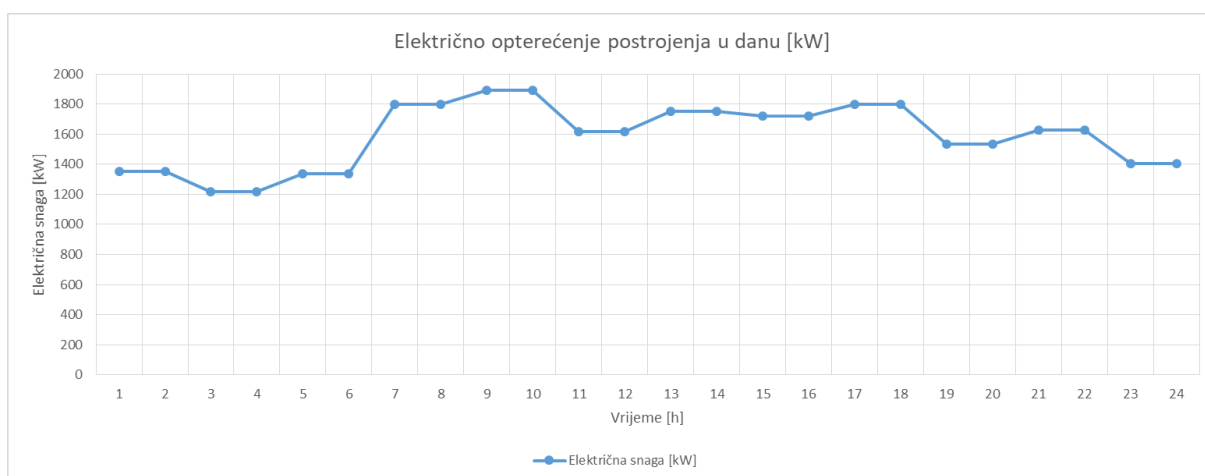
Isto tako, u obzir su uzeti i temperaturni režimi za pojedine procese u proizvodnji. Uvidom u potrebne temperaturne režim, odlučeno je da se za proces prešanja i dalje koriste postojeći kotlovi jer se prešanje odvija na visokim temperaturnim režimima koje ORC modul ne može postići. Određeni temperaturni režimi koji se koriste u proizvodnji u drvenoj industriji prikazuje Slika 20.



Slika 20. Temperaturni režimi za različite procese u drvnoj industriji [34]

4.1.1. Proračun nazivnog električnog opterećenja i godišnje potrošnje električne energije

Vlasnik je ustupio podatke o instaliranom električnom priključku na mrežu i o satnoj potrošnji električne energije koji su dobiveni ispitivanjem u periodu od dva tjedna. Postrojenje, koje obuhvaća pilanu te tvornicu parketa radi sedam dana u tjednu, 24 sata dnevno. Rade tijekom cijele godine. Oni nabavljaju električnu energiju koja je pod srednjim naponom te je zatim na svoja 4 transformatora pretvaraju u struju niskog napona. Mjerenje potrošnje vršeno je na transformatorima u periodu od 2 sata što je uzrokovalo da krivulja električnog opterećenja pokazuje isto opterećenje dva sata za redom. Slika 21. prikazuje karakteristično dnevno električno opterećenje postrojenja.



Slika 21. Prosječna potrošnja električne energije tijekom dana

4.1.2. Proračun toplinskog opterećenja i godišnje potrošnje toplinske energije

Vlasnik je također dao uvid u nazivne snage postojećih kotlova kao i nazivnu toplinsku snagu određenih dijelova postrojenja. Podjelu postrojenja izvršio je na: primarnu proizvodnju i upravu, sekundarnu proizvodnju, sušare i preše. Dao je i podatak o dnevnoj potrošnji drvene sječke za kotlovnice, izraženu u metrima kubnim, koju oni sami dobivaju prilikom proizvodnje parketa. Ostatak drvnog otpada pretvaraju u drvene pelete i brikete koje zatim prodaju. Kao što je već prije naglašeno, ORC može postizati temperaturu do 100°C, dok je za prešanje potrebna temperatura između 120 i 160°C. Prešanje se koristi za sklapanje parketa, proizvodnju briketa i peleta. Prilikom određivanja godišnje potrošnje toplinske energije za prešanje parketa, peleta i briketa korištena je literatura jer vlasnik nije dao informacije o toj potrošnji toplinske energije. Tako je prema [35], za prešanje višeslojnog furnira (koji sačinjava parket) uzeta potrošnja od 1 kWh/m², za prešanje peleta prema [36] i [37], uzeta je potrošnja od 75 kWh/t, a za proizvodnju briketa uzeta je potrošnja od 60 kWh/t prema [38]. Pomoću podataka o godišnjoj proizvodnji pojedinih stavki izračunata je potrebna toplinska energija koja se troši na te procese. Toplinska energija za prešanje nadomještati će se iz postojeće, manje kotlovnice nazivne snage 1.500 kW, a ostatak toplinske energije koji se koristi za druge procese dobivat će se iz ORC modula koje se dimenzionira prema vršnom toplinskom opterećenju.

- Ukupna godišnja potreba za toplinskom energijom dana je izrazom (6):

$$Q_n = \frac{1}{24} \cdot V_s \cdot \rho_s \cdot H_{ds} \cdot t \quad (6)$$

Pri čemu su:

Q_n – godišnja potrošnja toplinske energije [kWh]

V_s – trenutna dnevna potrošnja drvene sječke [m³/dan]

ρ_s – gustoća drvene sječke [kg/m³]

H_{ds} – donja ogrjevnost vrijednost drvene sječke [kWh/kg]

t – broj radnih sati postrojenja u godini [h]

- Toplinska energija potrebna za prešanje dana je izrazom (7):

$$Q_{pn} = (Q_{ppar} \cdot A_{par} + Q_{pp} \cdot m_p + Q_{pb} \cdot m_b) \cdot 12 \quad (7)$$

Pri čemu su:

Q_{pn} – godišnja potrošnja toplinske energije za prešanje [kWh]

Q_{ppar} – specifična potrošnja toplinske energije za prešanje parketa [kWh/m²]

A_{par} – mjesečna proizvodnja parketa [m²/mj]

Q_{pp} – specifična potrošnja toplinske energije za prešanje drvnih peleta [kWh/t]

m_p – mjesečna proizvodnja drvnih peleta [t/mj]

Q_{pb} – specifična potrošnja toplinske energije za prešanje briketa [kWh/t]

m_b – mjesečna proizvodnja briketa [t/mj]

4.1.3. Dimenzioniranje priključka na centralizirani toplinski sustav

U slučajevima u kojima se postrojenje spaja na centralizirani toplinski sustav, odnosno u ovom slučaju na zatvoreni toplinski sustav, uzete su lokacije postojećih stanica prema [39] kao što to prikazuje Slika 22.



Slika 22. Prikaz postojećih ZTS-a i planiranog ORC-a

Sustav koji spaja planirano postrojenje i ZTS-e dimenzioniran je pomoću *District Heating Assessment Tool-a* [41], točnije, iz tog programa su uzete veličine cijevi s obzirom na godišnju potrebu za toplinskom energijom, cijene i toplinski gubici u cjevovodu. Tablica 5. prikazuje dio tog programa koji je poslužio za određivanje gore navedenih stavki.

Tablica 5. Prikaz dijela tablice za određivanje dimenzija cjevovoda [41]

Data on district heating pipes						Investment costs	
						Rambøll data (incl. design and administration)	
D _N mm	Diameter mm	Velocity m/s	Flow m ³ /h	Supply MWh/year	Heat loss MWh/year/m	D _N mm	Design price €/m
D _n	Pipe diameter	Velocity	Flow m ³	Supply	Heat loss per meter	D _n	Investment cost
DN15	110,0	0,3	0,2	17,1	0,1	DN15	432
DN20	110,0	0,4	0,5	37,2	0,1	DN20	442
DN25	110,0	0,4	1,0	70,0	0,1	DN25	456
DN32	130,0	0,5	2,0	136,2	0,1	DN32	496
DN40	130,0	0,6	2,9	201,1	0,1	DN40	517
DN50	140,0	0,6	5,4	374,1	0,1	DN50	551
DN65	160,0	0,8	10,6	739,2	0,1	DN65	607
DN80	180,0	0,8	16,2	1125,2	0,1	DN80	675
DN100	230,0	1,0	32,4	2257,5	0,1	DN100	783
DN125	250,0	1,1	56,6	3939,1	0,3	DN125	924
DN150	280,0	1,3	93,7	6524,0	0,3	DN150	954
DN200	360,0	1,5	189,7	13205,5	0,3	DN200	1343
DN250	450,0	1,8	342,3	23823,6	0,3	DN250	1760
DN300	500,0	2,0	539,2	37527,4	0,4	DN300	2124

4.2. Ekonomska analiza planiranog postrojenja

Ekonomska analiza prikazuje sve prihode i rashode koji se pojavljuju tijekom izgradnje i vijeka trajanja projekta. Na temelju nje donosi se zaključak o isplativosti projekta, odnosno hoće li projekt donesti dobitke ili gubitke investitoru.

4.2.1. Prihodi

Svaki scenariji ima drugačije prihoda pa se tako pod prihode u pojedine scenarije uračunava:

- Prihod od prodaje električne energije na tržištu, koji se računa prema izrazu (8):

$$P_p = \sum E_{ti} \cdot C_{tei} \quad (8)$$

Pri čemu su:

P_p – prihod od prodaje električne energije na tržištu [kn]

E_{ti} – količina prodane električne energiju u i-tom satu [kWh]

C_{tei} – tržišna cijena električne energije u i-tom satu [kn/kWh]

- Prihod od tržišne premije, koji se računa prema izrazu (9):

$$P_{tp} = T_{pi} \cdot E_{ti} \quad (9)$$

Pri čemu su:

P_{tp} – prihod od tržišne premije [kn]

T_{pi} – iznos tržišne premije [kn/MWh]

E_{ti} – količina prodane električne energije na tržištu [MWh]

- Prihod od uštede električne energije, koji se računa prema izrazu (10):

$$P_u = E_u \cdot C_e \quad (10)$$

Pri čemu su:

P_u – prihod od uštede električne energije [kn]

E_u – ušteda električne energije [kWh]

C_e – kupovna cijena električne energije [kn/kWh]

- Prihod od naknade za isporučenu toplinsku energiju, koji se računa prema izrazu (11):

$$P_q = \sum Q_{ni} \cdot C_q \quad (11)$$

Pri čemu su:

P_q – prihod od naknade za isporučenu toplinsku energiju [kn]

Q_{ni} – isporučena toplina [kWh]

C_q – tarifna stavka za isporučenu toplinu [kn/kWh]

- Prihod od naknada za ugovorenu toplinsku snagu, koji se računa prema (12):

$$P_n = \sum C_n \cdot \Phi_{ni} \quad (12)$$

Pri čemu su:

P_n – prihod od naknade za ugovorenu toplinsku snagu [kn]

C_n – tarifna stavka snaga [kn/kW]

Φ_{ni} – iznos ugovorene toplinske snage [kW]

Cijene električne energije uzete su prema cijenama električne energije za tržište dan unaprijed s hrvatske burze električne energije CROPEX iz 2017. godine [42], a referentna vrijednost postrojenja, koja se koristi za izračunavanje tržišne premije, izračunata je i nalazi se unutar vrijednostima RV-a sličnih postrojenja u Njemačkoj [43]. Proračun, za izračun referentne tržišne vrijednosti, u ovom slučaju pojednostavljen je i ne slijedi u potpunosti proračun određen Uredbom [6]. Za izračun referentne tržišne cijene uzeta je samo cijena električne energije na hrvatskoj burzi u 2017., a cijene na regionalnim burzama kao i volumeni električne energije kojima se trgovalo na tim burzama nisu uzeti u obzir. Prihod od uštede električne energije uzet je samo kao ušteda isporučene električne energije, dok se ušteda od smanjenja zakupne snage postrojenja nije uzimala u obzir jer je moguće da dođe do prekida rada ORC-a te će postrojenje trebati preuzimati svu potrebnu električnu energiju iz mreže [44]. Iznos za isporučenu toplinsku energiju i zakupljeni iznos toplinske energije [45] uzet je kao prihod samog postrojenja, no realno je da gradska tvrtka koja je zadužena za održavanje sustava uzima dio prihoda za sebe.

4.2.2. *Rashodi*

Različiti scenariji imaju različite rashode, a to ovisi o veličini postrojenja, potrebi za gorivom kao i o tome ulaže li se u spajanje na postojeći CTS sustav. Neki od rashoda, koji variraju od scenarija do scenarija, dani su u nastavku:

- investicijski troškovi (dogradnja kotlova, ORC modul i mreža CTS-a),
- troškovi goriva (tvornica ne proizvodi dovoljno sječke za namirivanje potreba ORC-a, stoga dio moraju kupovati po cijeni od 0,47 kn/kg),
- troškovi održavanja,
- troškovi amortizacije i
- troškovi poreza na dobit.

4.2.2.1. *Izračun investicijskog troška izgradnje ORC-a i troška održavanja*

Iznos specifičnog investicijskog troška izgradnje ORC postrojenja dobiven je korištenjem podataka o specifičnim investicijskim troškovima postrojenja sličnih veličina kao postrojenje koje se analizira u ovom slučaju. Cijene se određuje prema izlaznoj električnoj snazi postrojenja. Pri prikupljanju podataka za izračun ove stavke korištena je literatura [46] i [47]. Postupak određivanja kreće upisivanjem određenih cijena i nazivnih snaga kWe u Excel. Iz tih podataka se zatim izrađuje graf koji služi za interpolaciju vrijednosti postrojenja, tj. dobivamo

jednadžbu u kojoj kao varijablu imamo električnu snagu, a kao rezultat dobivamo specifični investicijski trošak postrojenja. Nakon provedenog opisanog postupka dobili smo izraz (13):

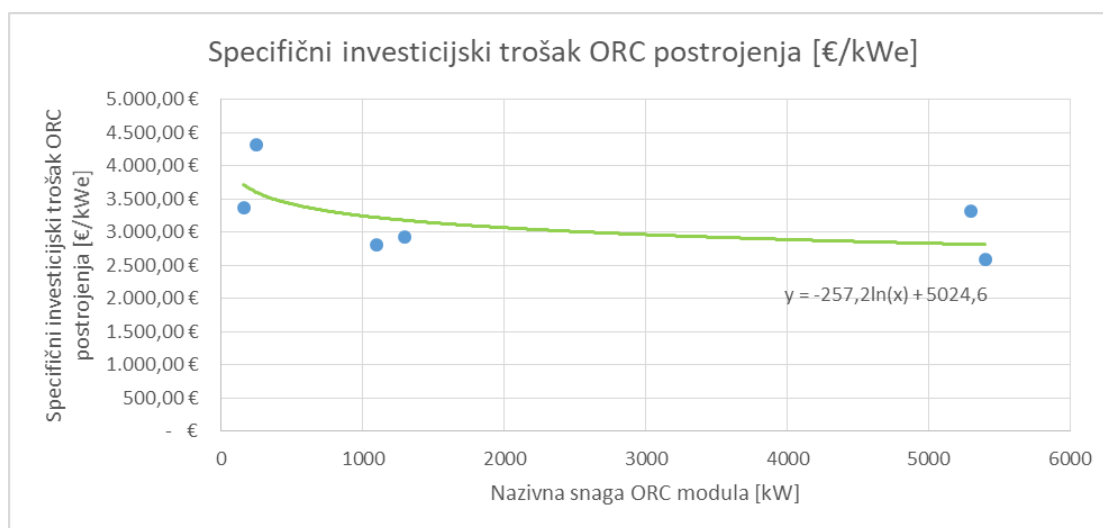
$$C_{ORC} = -257,2 \cdot \ln(P_{el}) + 5024,6 \quad (13)$$

Pri čemu su:

C_{ORC} – specifična investicijska cijena ORC postrojenja [€/kWe]

P_{el} – nazivna snaga ORC postrojenja [kWe]

Slika 23. prikazuje krivulju koja je poslužila za izračunavanje specifičnog investicijskog troška ORC postrojenja.



Slika 23. Specifični investicijski trošak ORC postrojenja

Prema danim podacima iz [20] uzeti su operativni troškovi u visini od 2% ukupne investicije. U literaturi se preporučuje zapošljavanje jednog radnika u postrojenju, no pretpostavljeno je da već postoje kompetentni zaposlenici u tvornici koji će biti preraspodijeljeni na to radno mjesto[19].

4.2.2.2. Izračun troškova izgradnje priključka na postojeći CTS

Glavni trošak ovog dijela investicije je izgradnja cjevovoda. Cijena ovisi o toplinskoj energiji koja će se prenositi cjevovodom. U tu cijenu je uključena i cijena projektne dokumentacije. Ostali troškovi, u vidu građevinskih i montažerskih radova, iznose oko 1.000.000 kn, a u slučaju proširenja mreže CTS-a oni iznose 2.000.000 kn [48]. Dio cjevovoda mora proći ispod pruge što također iziskuje određena financijska sredstva.

5. ANALIZA SLUČAJA

Tvrtka Bjelin d.o.o. se bavi proizvodnjom parketa i podnih obloga od hrasta jasena i bukve. U Hrvatskoj imaju pogone u Bjelovaru i Ogulinu, a sjedište tvrtke je u Ogulinu. Zapošljavaju 535 djelatnika, od toga broja, u Ogulinu zaposleno je 325 osoba. U Ogulinu se gradi i novi pogon podnih obloga koji će se prostirati na 350.000 m², a zaposlit će još dodatnih 500 radnika [49].

U postojećem postrojenju u Ogulinu instalirana električna snaga iznosi 4.600 kW. Električnu energiju kupuju pod srednjim naponom kojeg onda transformiraju u niski napon pomoću 4 transformatora. Toplinsku energiju dobivaju spaljivanjem drvene sječke u kotlovnica nazivnih snaga 1.500 kW i 5.000 kW. Podjelu postrojenja na proizvodnu jedinicu s pripadajućim vršnim toplinskim opterećenjima prikazuje Tablica 6.

Tablica 6. Proizvodna jedinica s vršnim toplinskim opterećenjem

Proizvodna jedinica	Vršno toplinsko opterećenje [kW]
Primarna proizvodnja i uprava	1.000
Finalna proizvodnja	2.000
Sušare	1.000
Preše	1.000

Dio proizvodnog pogona prikazuje Slika 24., a proizvodnju i potrošnju određenih drvnih proizvoda u tvornici prikazuje Tablica 7.



Slika 24. Pilana postrojenja u Ogulinu [50]

Tablica 7. Proizvodnja i potrošnja određenih drvnih proizvoda

Drvni proizvod	Iznos
Proizvodnja parketa [m ² /mj]	110.000
Proizvodnja drvnih briketa [t/mj]	500
Proizvodnja drvnih peleta [t/mj]	1.000
Potrošnja drvene sječke u kotlovnica [m ³ /dan]	40

5.1. Scenarij 1

U scenariju 1 ugrađuje se ORC modul uz kotlovnicu nazivne snage 6.500 kW. ORC modul odabran je uz pomoć Turboden kataloga ORC modula [51] tako da zadovolji vršne potrebe za toplinskom energijom sušara, primarne proizvodnje i finalne proizvodnje. Za zadovoljavanje toplinskih potreba preša, kako je to već naglašeno, koristi se postojeća kotlovnica od 1.500 kW zbog nemogućnosti postizanja traženih temperaturnih režima za prešanje pomoću ORC-a. Temperaturni režim koji se postiže u ovom postrojenju je polaz od 90°C i povrat od 60°C. Izlazna toplinska snaga ORC-a je 5.000 kWt, a izlazna električna snaga 1.100 kWe. Ovaj scenarij, kao i svi drugi, podijeljen je u dva podscenarija. U jednom se električna energija koristi za potrebe tvornici, a višak se nadomješta iz mreže, a u drugom se podscenariju sva električna energija prodaje na tržištu i uz tu cijenu tvornici se isplaćuje klizna tržišna premija. Kada je tvornica u sustavu poticaja tržišnom premijom sva se potrebna električnu energija za proizvodnju uzima iz mreže. Specifični investicijski trošak izgradnje ovog postrojenja izračunat je pomoću već spomenute formule i iznosi 3.223,41 €/kWe. Sječka potreba za pogon ORC dijelom se nadomješta iz vlastite proizvodnje, a dio se kupuje.

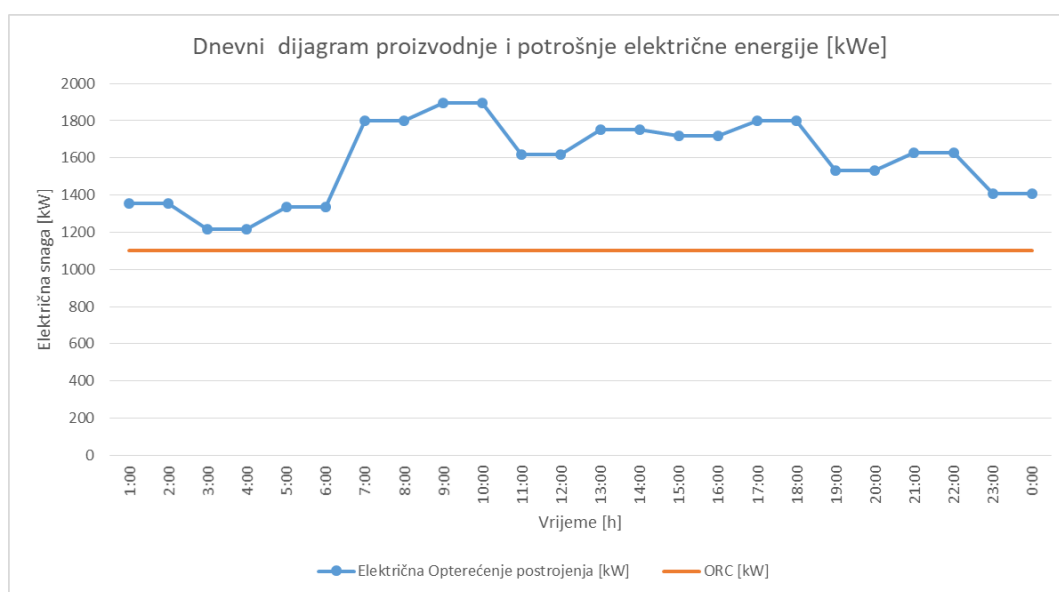
5.1.1. Scenarij 1-a

U ovom podscenariju sva proizvedena električna energija koristi se u tvornici, a ostatak potrebne električne energije nadomješta se iz mreže. U većini slučajeva veliki potrošači električne energije imaju ugovorene niže cijene s distributerima električne energije. Pretpostavlja se da je to i ovdje slučaj, ali se to nije moglo utvrditi jer vlasnik nije pružio uvid u vlastiti račun za električnu energiju. Stoga su za cijenu električne energije uzete vrijednosti koje nudi HEP na svojim internetskim stranicama. Uzete vrijednosti prikazuje Tablica 8.

Tablica 8. Prikaz pojedinih tarifnih stavki [44]

Kategorija/naponska razina		Tarifni model	Tarifni element			
			Radna snaga		Radna snaga	Naknada za obračunsko mjerno mjesto
			VT	NT		
			[kn/kWh]	[kn/kWh]	[kn/kW]	[kn/mj]
			Tarifne stavke			
Poduzetništvo	Srednji napon	Bijeli	0,72	0,40	29,50	66,00
			0,17	0,08	29,50	66,00

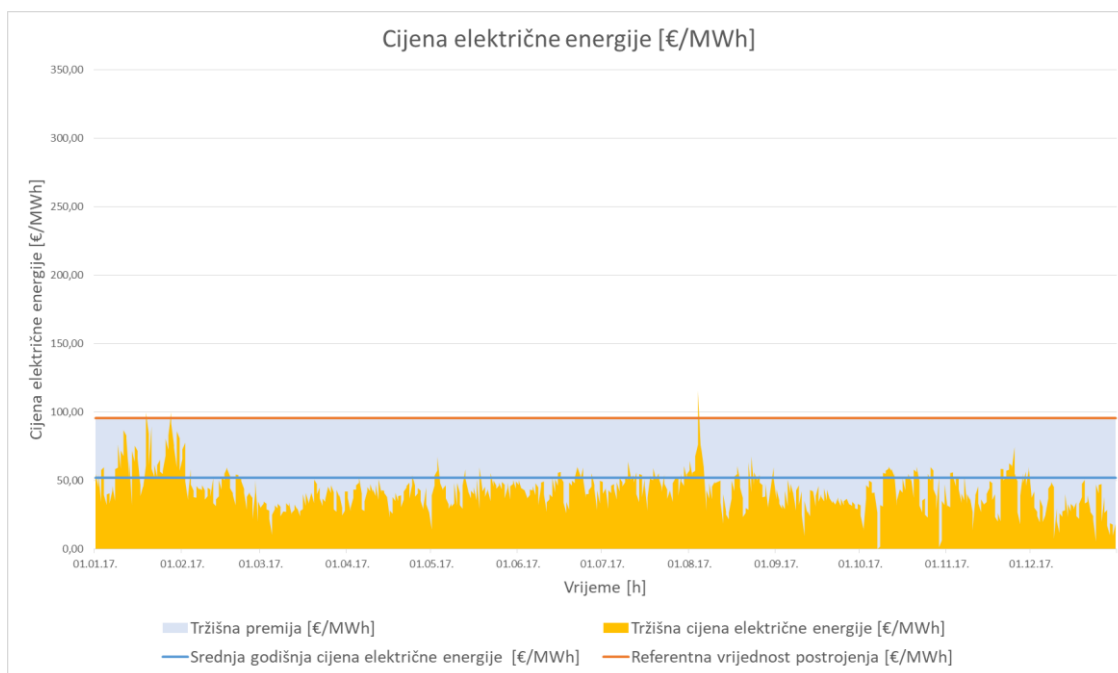
Odnos satne proizvodnje i potrošnje električne energije prikazuje Slika 25.



Slika 25. Dnevni dijagram proizvodnje i potrošnje električne energije

5.1.2. Scenarij 1-b

Razlika ovog podscenarija s prethodnim je ta da se ovdje pretpostavlja da je vlasnik postrojenja ostvario poticaj proizvodnje električne energije tržišnom premijom. Sva se električna energija prodaje na tržištu uz što se proizvođaču isplaćuje klizna tržišna premija. Kao pomoć pri izračunu referentne vrijednosti postrojenja za određivanje iznosa tržišne premije poslužila je Uredba o poticanju proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora energije i visokoučinkovitih kogeneracija [6]. Okvirno je uzeto da RV iznosi 96,36 €/MWh za postrojenje ove veličine. Taj iznos nalazi se unutar granica referentnih vrijednosti za ovaj tip postrojenja u Njemačkoj [43]. Tržišne cijene električne energije uzete su prema tržišnim vrijednostima na CROPEX-u u 2017. [42]. Odnos satnih tržišnih cijena, referentne vrijednosti postrojenja kao i iznos tržišne premije koji se isplaćuje prikazuje Slika 26.



Slika 26. Prikaz odnosa kretanja tržišnih cijena i referentne vrijednosti

5.2. Scenarij 2

U ovom scenariju ORC postrojenje odabrano je tako da pokriva bazno satno električno opterećenje postrojenja. Stoga je odabran modul neto električne snage 1.200 kWe i toplinske snage 5.100 kWt. Toplina se, kao i u prethodnom primjeru, iskorištava u postrojenju. Zbog povećanja postrojenja blago se smanjio i specifični investicijski trošak na 3.201,30 €/kWe. Ovaj scenarij je također podijeljen u dva podscenarija. Jedan, u kojem se sva električna energija iskorištava u proizvodnji, a ostatak se preuzima iz mreže i drugi, u kojem se sva proizvedena električna energija prodaje na tržištu te se uz to, proizvođaču isplaćuje tržišna premija. Iznos referentne vrijednosti je određen u iznosu 95,82 €/MWe što se isto nalazi unutar granica referentnih vrijednosti za ovakva postrojenja u Njemačkoj. Ostali pretpostavke i parametri isti su kao u prethodnom scenariju.

5.3. Scenarij 3

U trećem scenariju, ORC postrojenje je isto kao i u scenariju 2. Razlika je u tome što se uz korištenje proizvedene topline u tvornici dio toplinske energije prodaje u jedan od dva ZTS-a grada Ogulina. Podaci o godišnjoj potrošnji toplinske energije kao i o vrsti krajnjih korisnika preuzeti su iz Programa korištenja potencijala za učinkovitost u grijanju i hlađenju za razdoblje

2016.-2030. [52]. U situacijama u kojima ORC sam ne može zadovoljiti toplinske potrebe potrošača spojenih na mrežu uključuje se postojeća kotlovnica ZTS-a. Za cijene toplinske energije i zakupljene toplinske snage uzeti su podaci od gradskog poduzeća grada Ogulina koje je zaduženo za opskrbu toplinskom energijom [45]. Cijena toplinske energije za kućanstvo iznosi 0,41 kn/kWh i 0,51 kn/kWh za poslovne objekte. Za zakupljenu toplinsku snagu svi krajnji potrošači plaćaju 22 kn/kW. I u ovom scenariju analizirana su dva slučaja, jedan, u kojem se prihod ostvaruje od uštede električne energije i drugi, u kojem se prihod ostvaruje od prodaje električne energije na tržištu uz što se vlasniku isplaćuje tržišna premija.

5.4. Scenarij 4

U posljednjem scenariju ORC postrojenje dimenzionirano je kao i u scenariju 2 i 3. U ovom scenariju se kao i u prethodnom, dio proizvedene toplinske energije koristi u proizvodnji, a dio se prodaje. Razlika je u tome što se u ovom primjeru toplina prodaje u oba ZTS-a grada Ogulina. Kada postrojenje ne može zadovoljiti potražnju za toplinskom energijom korisnika u mreži, uključuje se jedna, ili obje postojeće kotlovnice CTS-a zavisi o potrebi. Sve ostale vrijednosti i tarifne stavke iste su kao u 3. scenariju. Ovaj scenarij je isto podijeljen u dva podscenarija, u jedan, s tržišnom premijom i drugi, u kojem se prihod ostvaruje od uštede električne energije.

Ostali tehno-ekonomski parametri koji su korišteni u analizi svih scenarija prikazuje Tablica 9., dio njih je preuzet iz [53], a ostali iz navedene literature.

Tablica 9. Tehno-ekonomski parametri korišteni u analizi

Tehnički parametri	
Ogrjevna vrijednost biomase [kWh/kg]	3,5
Gustoća biomase [kg/m ³]	696,25
Količina vlastite drvene sječke [t/god]	10.165
Radni sati postrojenja godišnje [h]	8.760
Ekonomski parametri	
Kupovna cijena drvene sječke [€/t]	35
Trajanje projekta [god]	10
Vlastita sredstva na raspolaganju [kn]	9.000.000
Kamatna stopa kredita banke [%] [54]	3,54
Nominalna diskontna stopa [%]	6
Amortizacija opreme [% opreme/god] [55]	6
Amortizacija građevina [% građevine/god]	5

Tablica 10. prikazuje sve scenarije s pripadajućim karakteristikama postrojenja.

Tablica 10. Zbirni prikaz karakteristika postrojenja pojedinih scenarija

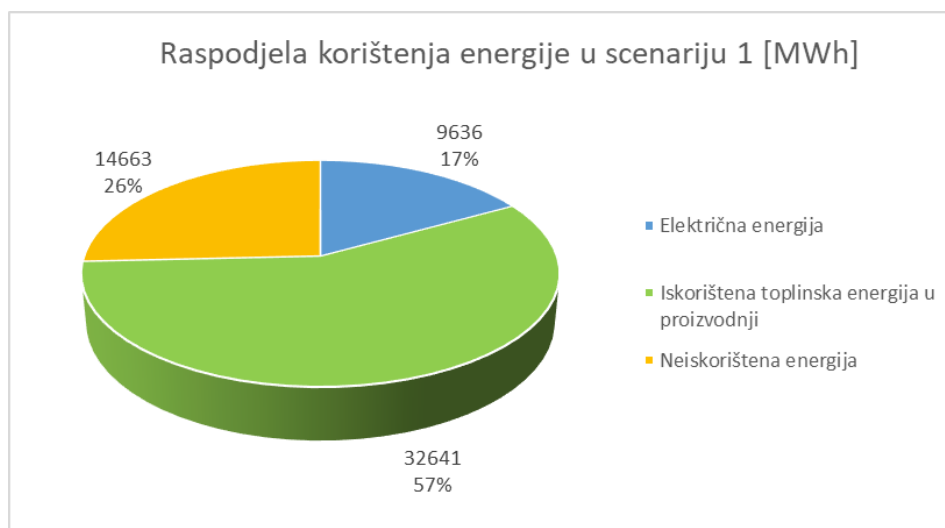
	Scenarij 1		Scenarij 2		Scenarij 3		Scenarij 4	
	1-a	1-b	2-a	2-b	3-a	3-b	4-a	4-b
Nazivna snaga kotla [kW]	6.500	6.500	6.500	6.500	6.500	6.500	6.500	6.500
ORC električna snaga [kW]	1.150	1.150	1.260	1.260	1.260	1.260	1.260	1.260
ORC neto električna snaga [kW]	1.100	1.100	1.200	1.200	1.200	1.200	1.200	1.200
ORC toplinska snaga [kW]	5.000	5.000	5.100	5.100	5.100	5.100	5.100	5.100
Iskorištena toplinska energija u tvornici [MWh/god]	32.641	32.641	32.641	32.641	32.641	32.641	32.641	32.641
Predano toplinske energije u CTS [MWh/god]	-	-	-	-	733	733	1.136	1.136
Prodaja električne energije	Ne	Da	Ne	Da	Ne	Da	Ne	Da
Prihod od tržišne premije	Ne	Da	Ne	Da	Ne	Da	Ne	Da
Specifični investicijski trošak ORC-a [€/kWe]	3.223	3.223	3.201	3.201	3.201	3.201	3.201	3.201
Kriterij odabira ORC-a	Vršno toplinsko opterećenje tvornice (bez preša)		Bazno električno opterećenje tvornice		Bazno električno opterećenje tvornice		Bazno električno opterećenje tvornice	

6. REZULTATI TEHNO-EKONOMSKE ANALIZE KOGENERACIJSKOG POSTROJENJA

Rezultati tehno-ekonomske analize, 4 scenarija s pripadajućim podscenarijima, prikazuju kako je postrojenje dimenzionirano i koliki je iznos ekonomskih parametara određenog projekta. Analiza osjetljivosti služi kako bi se ispitala isplativost projekta ako se promjeni vrijednosti neke od ulaznih varijabli.

6.1. Scenarij 1

U ovom scenariju, nakon provedene tehničke analize, utvrđeno je da udio neiskorištene toplinske energije iznosi 26%, što je zadovoljavajući rezultat. Udio bi bio i manji da je poznata dinamika korištenja toplinske energije cijelog postrojenja jer bi se tada postrojenje dimenzioniralo prema tom podatku, a ne prema zbroju vršnih toplinskih opterećenja svih sastavnica proizvodnje. Raspodjelu korištenja energije u ovom scenariju prikazuje Slika 27. Nedostatak ovako dimenzioniranog ORC postrojenja je to da se više ne mogu priključivati dodatni potrošači u tvornici u slučaju da vlasnik želi povećati svoje proizvodne kapacitete. Kada bi se priključio veći broj potrošača, u trenucima vršnog toplinskog opterećenja, došlo bi do manjka toplinske energije za pojedine potrošače.



Slika 27. Raspodjela korištenja energije u scenariju 1

6.1.1. Scenarij 1-a

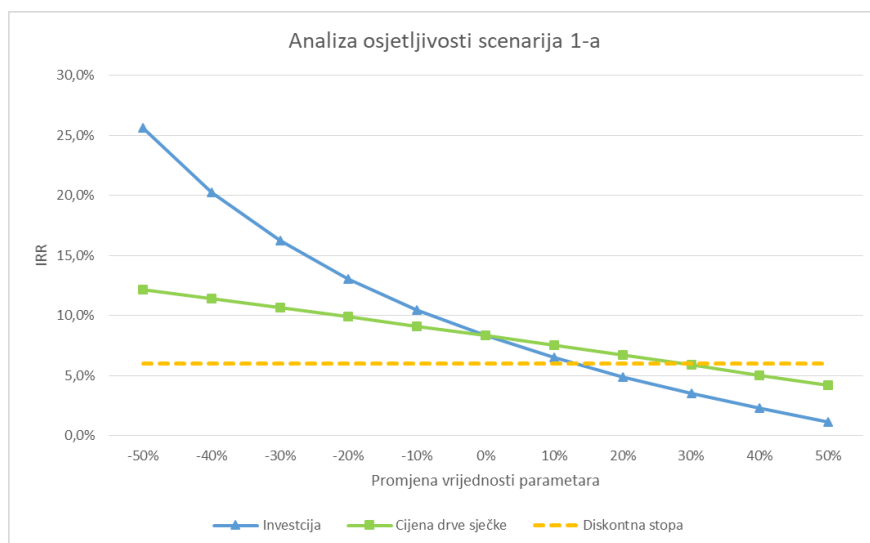
U ovom podscenariju, kao jedini prihod uzeta je ušteda električne energije koja godišnje iznosi 6.929.890 kn. Ta vrijednost u stvarnosti je niža jer veliki potrošači imaju ugovorene niže cijene električne energije. Zbog nemogućnosti uvida u taj iznos računato je s višom cijenom. Prihoda od toplinske energije nema zato što se i do sada toplinska energija dobivala u tvornici,

izgaranjem drvene sječke nastale u proizvodnji. Način pretvorbe energije bio je drugačiji, ali to ne predstavlja razliku gledajući ekonomsku stranu projekta. Neto sadašnja vrijednost projekta (NPV) iznosi 4.612.123 kn, a unutrašnja stopa povrata (IRR) iznosi 8,3% što ukazuje na isplativost projekta u ovako postavljenom slučaju. Period povrata (PP) iznosi 6,62 godine. Kada bi ovaj scenarij imao NPV jednak 0, odnosno kada bi bio na granici isplativosti, prihod od uštede električne energije mogao bi iznositi 6.201.486 kn što znači da je moguća isplativost projekta i kad su cijene električne energije koju proizvođač kupuje manje od odabrane, ali u ograničenom rasponu. Tablica 11. prikazuje rezultate tehno-ekonomske analize scenarija 1-a.

Tablica 11. Rezultati tehno-ekonomske analize scenarija 1-a

Proizvodnja električne energije [MWh/god]	9.636
Vlastita potrošnja električne energije [MWh/god]	9.636
Proizvodnja topline [MWh/god]	43.800
Potrošnja biomase [t/god]	16.269
Ukupni stupanj djelovanja [%]	74
Prihod od uštede električne energije [kn/god]	6.929.890
Troškovi goriva [kn/god]	1.800.528
Održavanje [kn/god]	551.754
Godišnja bruto dobit [kn/god]	4.577.607
Investicija [kn]	27.587.715
IRR [%]	8,3
NPV [kn]	4.612.123
Period povrata [god]	6,62

Slika 28. prikazuje analizu osjetljivosti ovog scenarija. Iz priloženog se vidi da na isplativost projekta najviše utječe promjena vrijednosti investicija dok promjena cijene goriva, odnosno drvene sječke, nema veliki utjecaj na isplativost ovog projekta.



Slika 28. Analiza osjetljivosti scenarija 1-a

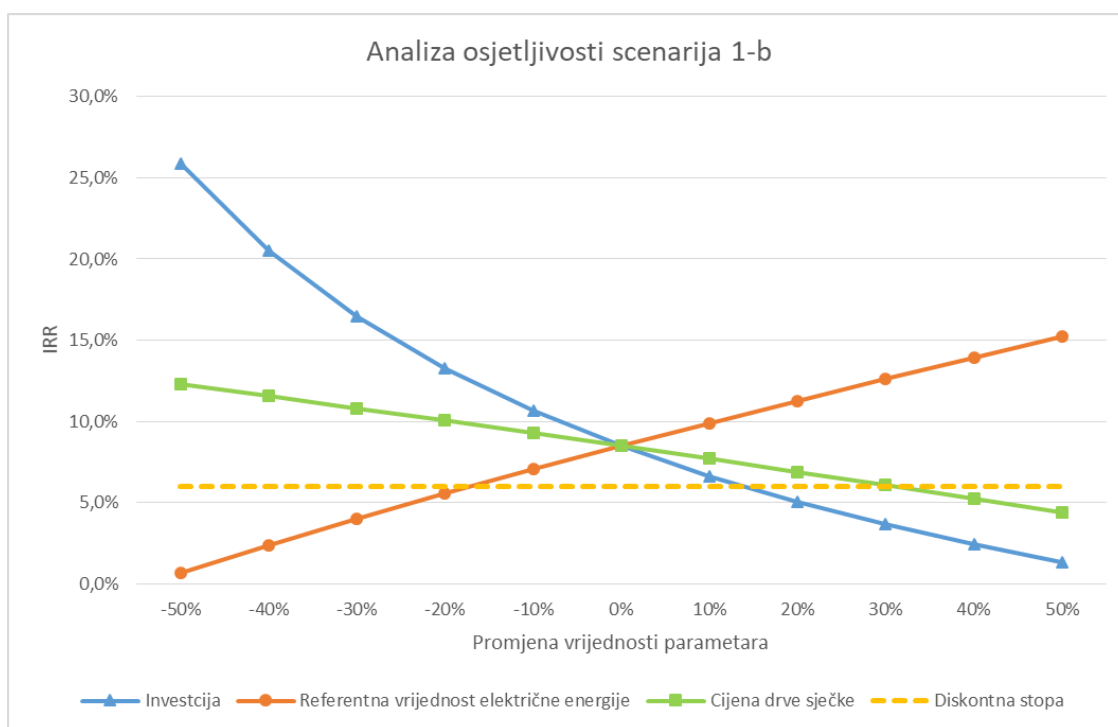
6.1.2. Scenarij 1-b

U ovom podscenariju glavni prihod postrojenja je prihod od prodaje električne energije na tržištu za koji se vlasniku još isplaćuje klizna tržišna premija. Godišnji prihod od prodaje električne energije iznosi 3.708.647 kn, a od tržišne premije iznosi 3.262.308 kn što sumarno daje 6.970.955 kn. To je nešto više od prihoda od uštede električne energije u prethodnom scenariju, ali u stvarnosti bi ta brojka trebala biti dosta viša od iznosa uštede električne energije. Uzrok tomu je, kako je već prije naglašeno, visoka cijena električne energije. Prihoda od toplinske energije nema iz istog razloga kao u prethodnom scenariju. NPV u ovom slučaju iznosi 4.872.145 kn, dok je vrijednost IRR-a 8,5%. Period povrata je 6,65 godina. Tablica 12. prikazuje rezultate tehno-ekonomske analize scenarija 1-b.

Tablica 12. Rezultati tehno-ekonomske analize scenarija 1-b

Proizvodnja električne energije [MWh/god]	9.636
Prodaja električne energije [MWh/god]	9.636
Proizvodnja topline [MWh/god]	43.800
Potrošnja biomase [t/god]	16.269
Ukupni stupanj djelovanja [%]	74
Prihod od prodaje električne energije [kn/god]	3.708.647
Prihod od tržišne premije [kn/god]	3.043.763
Troškovi goriva [kn/god]	1.800.528
Održavanje [kn/god]	551.754
Godišnja bruto dobit [kn/god]	4.618.673
Investicija [kn]	27.587.715
IRR [%]	8,5
NPV [kn]	4.872.145
Period povrata [god]	6,56

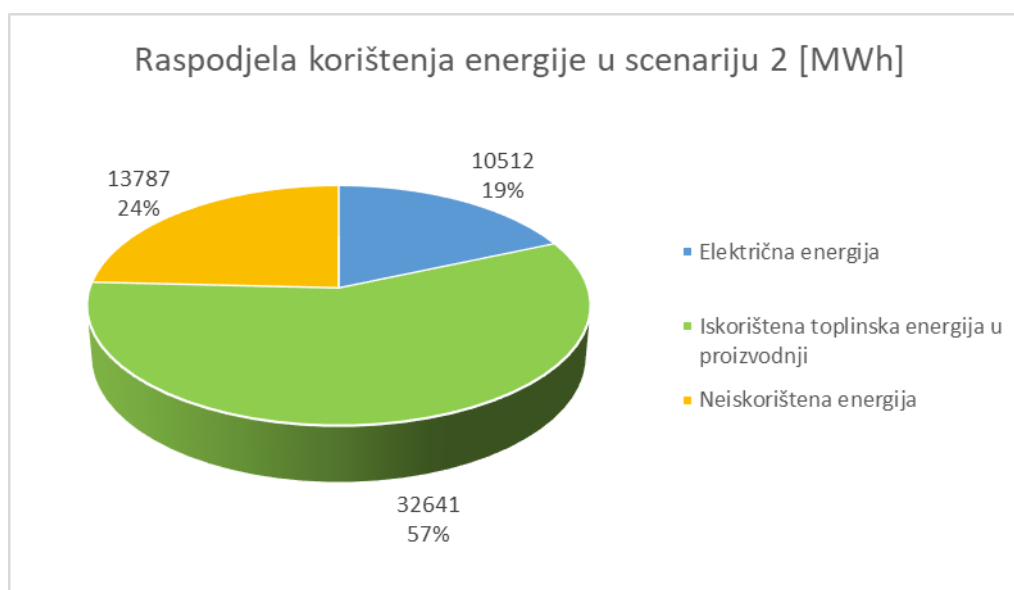
Prodaja električne energije na tržištu uz poticaj tržišnom premijom daje nešto viši NPV, IRR i kraći PP što ukazuje na to da je ovaj slučaj profitabilniji. Što se tiče utjecaja pojedinih parametara na isplativost projekta, njih prikazuje Slika 29. Iz prikaza je vidljivo da i u ovom slučaju na isplativost projekta najviše utječe investicijski trošak. Zatim, najveći utjecaj ima promjena iznosa referentne vrijednosti električne energije koja utječe na iznos tržišne premije. Najmanji utjecaj na isplativost projekta ima cijena drvene sječke za potrebe postrojenja. Projekt je isplativ u slučajevima kada se vrijednosti parametara nalaze iznad linije tražene diskontne stope. U ovom slučaju, projekt je isplativ pri promjenama vrijednosti bilo kojeg parametra od -15% do +10% od početne vrijednosti.



Slika 29. Analiza osjetljivosti scenarija 1-b

6.2. Scenarij 2

U ovom scenariju postrojenje je dimenzionirano prema baznom električnom opterećenju postrojenja. Zbog činjenice da je moguće povećati proizvodnju električne energije uz jednak unos drvene sječke ukupna stupanj djelovanja ovog postrojenja je viši, nego u scenariju 1 i on iznosi 76%. Raspodjelu korištenja energije prikazuje Slika 30.



Slika 30. Raspodjela korištenja energije u scenariju 2

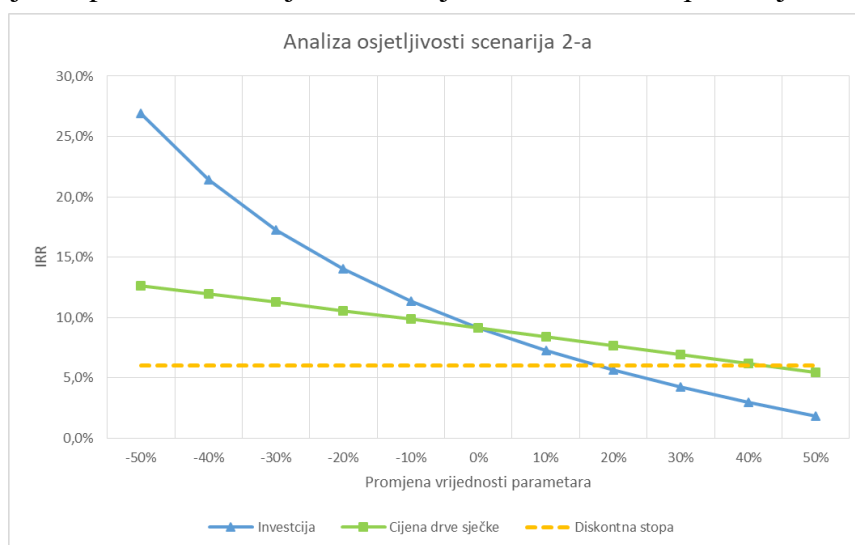
6.2.1. Scenarij 2-a

U ovom scenariju prihod se ostvaruje od uštede električne energije. Godišnji iznos uštede električne energije je 7.559.880 kn. Prihoda od prodaje toplinske energije nema jer se toplinska energija dobivala i prije na navedenoj lokaciji. Projekt je po svim parametrima isplativ unutar 10 godina. NPV iznosi 6.313.286 kn, IRR 9,15%, a period povrata iznosi 6,26 godina. Ovo su bolji rezultati, nego što su to rezultati u scenariju 1. To znači da i iznos uštede električne energije može biti nešto manja (niža cijena po kojoj vlasnik kupuje električnu energiju), a da to ne uzrokuje neprofitabilnost projekta. Tablica 13. prikazuje rezultate tehno-ekonomske analize scenarija 2-a.

Tablica 13. Rezultati tehno-ekonomske analize scenarija 2-a

Proizvodnja električne energije [MWh/god]	10.512
Vlastita potrošnja električne energije [MWh/god]	10.512
Proizvodnja topline [MWh/god]	44.790
Potrošnja biomase [t/god]	16.269
Ukupni stupanj djelovanja [%]	76
Prihod od uštede električne energije [kn/god]	7.559.880
Troškovi goriva [kn/god]	1.800.528
Održavanje [kn/god]	597.785
Godišnja bruto dobit [kn/god]	5.161.566
Investicija [kn]	29.889.257
IRR [%]	9,15
NPV [kn]	6.313.286
Period povrata [god]	6,38

I u ovom scenariju najveći utjecaj na isplativost projekta ima promjena vrijednosti investicije, a manji utjecaj na isplativost ima cijena drvene sječke. Tu ovisnost prikazuje Slika 31.



Slika 31. Analiza osjetljivosti scenarija 2-a

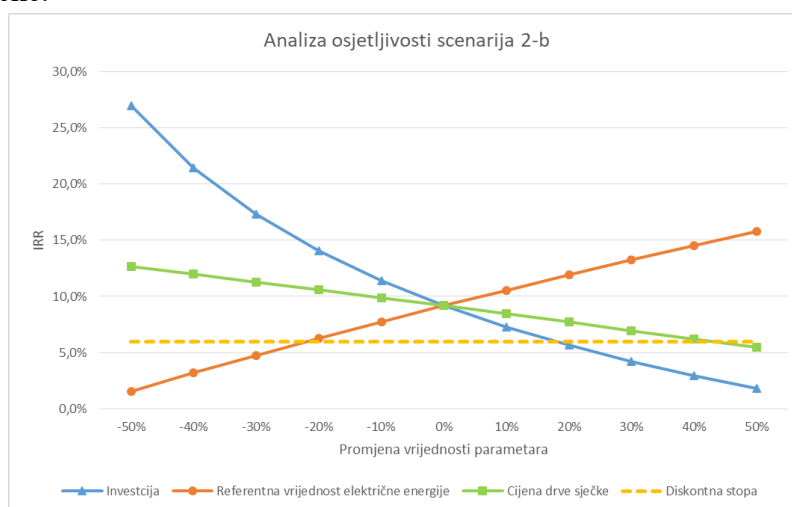
6.2.2. Scenarij 2-b

Kada se proizvodnja električne energije potiče tržišnom premijom rezultati su bolji, nego u slučaju gdje se samo gleda ušteda električne energije. Godišnji prihod od prodaje električne energije na tržištu iznosi 4.045.797 kn, a prihod od tržišne premije iznosi 3.519.048 kn. Ukupno je to 7.564.845 kn godišnje. Prihoda od toplinske energije nema iz istog razloga kao u prethodnom podscenariju. Ovaj projekt isplativ je po svim pokazateljima, NPV iznosi 6.344.728 kn, IRR iznosi 9,17%, a period povrata je 6,37 godine. Rezultate tehno-ekonomske analize prikazuje Tablica 14.

Tablica 14. Rezultati tehno-ekonomske analize scenarija 2-b

Proizvodnja električne energije [MWh/god]	10.512
Vlastita potrošnja električne energije [MWh/god]	10.512
Proizvodnja topline [MWh/god]	44.790
Potrošnja biomase [t/god]	16.269
Ukupni stupanj djelovanja [%]	76
Prihod od prodaje električne energije [kn/god]	4.045.797
Prihod od tržišne premije [kn/god]	3.519.048
Troškovi goriva [kn/god]	1.800.528
Održavanje [kn/god]	597.785
Bruto godišnja dobit [kn/god]	5.166.532
Investicija [kn]	29.889.257
IRR [%]	9,17
NPV [kn]	6.344.728
Period povrata [god]	6,37

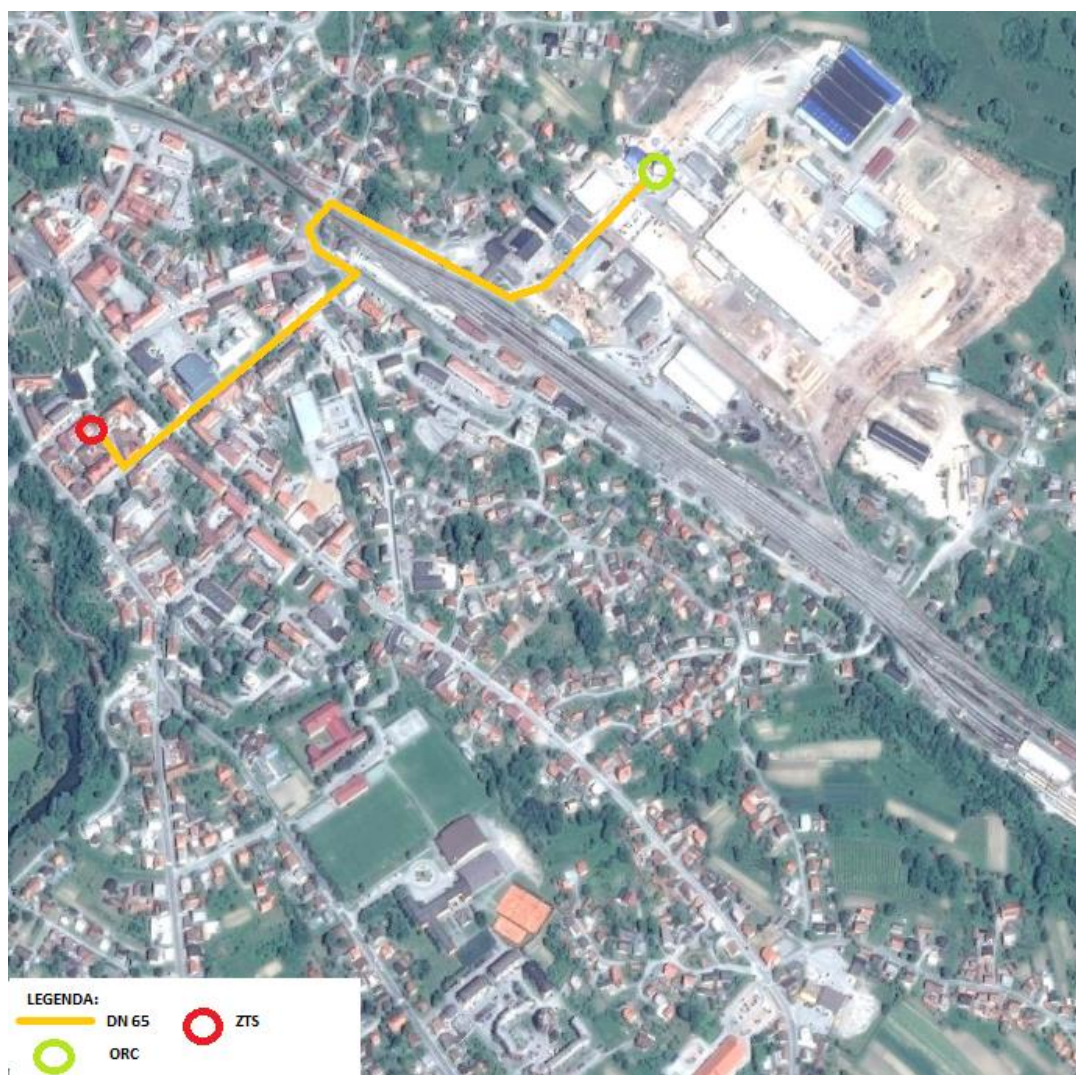
Analiza osjetljivosti, koju prikazuje Slika 32., ovog scenarija pokazala je da je isplativost projekta najviše uvjetovana cijenom investicije, a isplativost projekta najmanje je ovisna o cijeni drvene sječke.



Slika 32. Analiza osjetljivosti scenarija 2-b

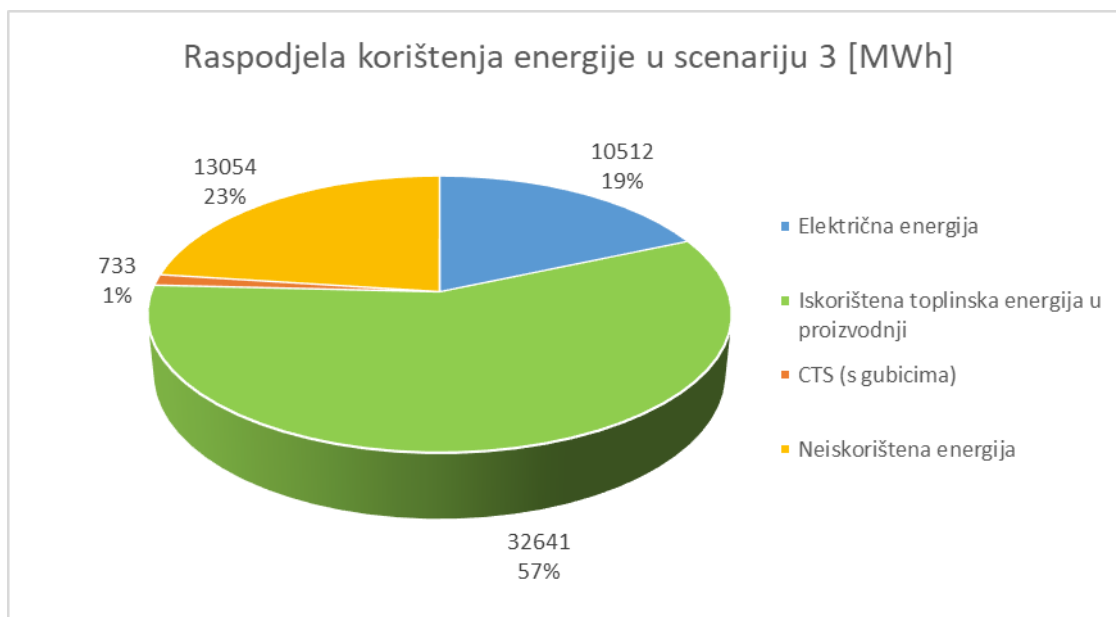
6.3. Scenarij 3

U scenariju 3 ostvaruje se dodatni prihod od prodaje toplinske energije u jedan od dva ZTS-a grada Ogulina. Godišnja potrošnja toplinske energije tog ZTS-a iznosi 649.960 kWh i prema njoj su odabrane cijevi, za što je poslužila Tablica 5. Za spoj ORC-a i ZTS-a uzete su cijevi DN 65 u duljini od 830 m. Toplinski gubici cjevovoda iznose 100 kWh/m/god. Trasu cjevovoda i točne lokacije pojedinih objekata prikazuje Slika 33.



Slika 33. Trasa cjevovoda od ORC-a do ZTS-a grada Ogulina

U ovom slučaju postrojenje je istih parametara kao i u scenariju 2. Ukupni stupanj djelovanja postrojenja iznosi 77%. Razlog povećanja tog stupnja je što se dio energije, koji je u prihodnim promjerim ostajao neiskorišten, sada iskorištava za ZTS. Raspodjelu iskorištavanja energije u scenariju 3 prikazuje Slika 34.



Slika 34. Raspodjela korištenja energije u scenariju 3

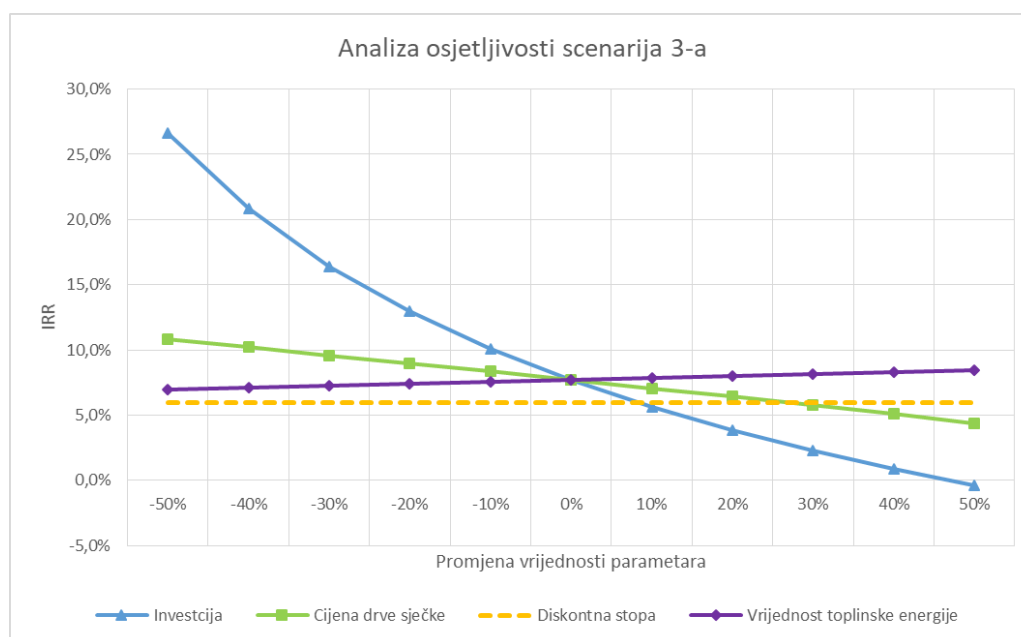
6.3.1. Scenarij 3-a

U ovom podscenariju prihodi koji se ostvaruju su: prihod od uštede električne energije, prihod od prodaje toplinske energije u CTS kao i prihod od zakupljene toplinske energije. NPV koji se ostvaruje u ovako postavljenom scenariju iznosi 4.705.481 kn, period povrata iznosi 6,8 godina. IRR iznosi 7,71%. Rezultati su lošiji, nego u prethodna dva scenarija zato što imamo dodatni rashod izgradnje cjevovoda. Prihod ostvaren prodajom toplinske energije nije dovoljno velik da bi pokrio taj dodatni rashod. To se može promijeniti spajanjem većeg broja korisnika na mrežu, ali i spajanjem korisnika na planiranu trasu cjevovoda između ORC-a i CTS-a. Linearna gustoća toplinske energije u ovom scenariju iznosi 783 kWh/m. U literaturi je navedena vrijednost od 4 MWh/m [57] ispod koje se ne bi trebalo ići ako se želi postići isplativost projekta, no ne postoji univerzalna vrijednost koju bi trebalo zadovoljiti jer svaki slučaj ima specifične parametre koji utječu na graničnu vrijednost isplativosti. Glavni prihod u ovom scenariju je prihod od uštede električne energije koji je glavni čimbenik u povećanju ekonomskih pokazatelja. Rezultate tehno-ekonomske analize prikazuje Tablica 15.

Tablica 15. Rezultati tehno-ekonske analize scenarija 3-a

Proizvodnja električne energije [MWh/god]	10.512
Vlastita potrošnja električne energije [MWh/god]	10.512
Proizvodnja topline [MWh/god]	44.790
Potrošnja biomase [t/god]	16.269
Ukupni stupanj djelovanja [%]	77
Toplina predana u CTS [MWh/god]	733
Prihod od uštede električne energije [kn/god]	7.559.880
Prihod od CTS-a [kn/god]	415.851
Troškovi goriva [kn/god]	1.800.528
Održavanje [kn/god]	597.785
Bruto godišnja dobit [kn/god]	5.577.417
Investicija [kn]	34.622.489
IRR [%]	7,71
NPV [kn]	4.705.481
Period povrata [god]	6,8

Iz analize osjetljivosti ovog scenarija vidljivo je da isplativost projekta najviše ovisi o visini početne investicije. Zbog malog prihoda od prodaje toplinske energije u CTS, cijena toplinske energije vrlo malo utječe na isplativost projekta. To je vidljivo i u slučaju kada kućanstva i poslovni objekti ne bi plaćali potrošenu toplinsku energiju (sada kućanstva plaćaju 0,41 kn/kWh, a poslovni objekti 0,51 kn/kWh) jer bi i tada projekt imao NPV veći od 0. Analizu osjetljivosti ovog scenarija prikazuje Slika 35.

**Slika 35. Analiza osjetljivosti scenarija 3-a**

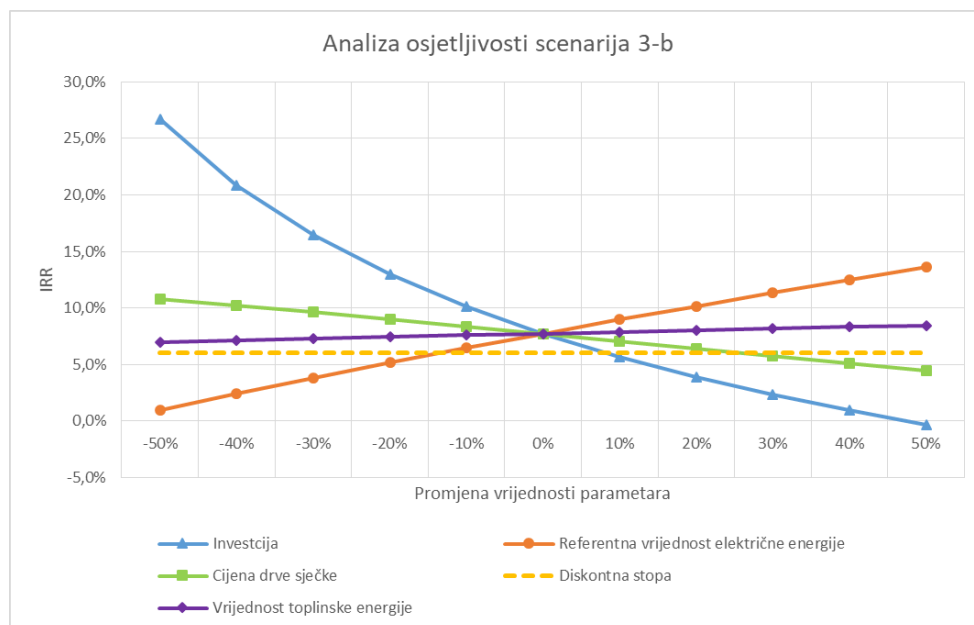
6.3.2. Scenarij 3-b

Razlika isplativosti scenarija s tržišnom premijom i s uštedom električne energije gotovo da i nema. Pa se tako uz poticanje tržišnom premijom ostvaruje IRR od 7,73%. NPV iznosi 4.736.924 kn, a period povrata 6,79 godina. Tablica 16. prikazuje rezultate tehno-ekonomske analize ovog scenarija.

Tablica 16. Rezultati tehno-ekonomske analize scenarija 3-b

Proizvodnja električne energije [MWh/god]	10.512
Vlastita potrošnja električne energije [MWh/god]	10.512
Proizvodnja topline [MWh/god]	44.790
Potrošnja biomase [t/god]	16.269
Ukupni stupanj djelovanja [%]	77
Toplina predana u CTS [MWh/god]	733
Prihod od prodaje električne energije [kn/god]	4.045.797
Prihod od tržišne premije [kn/god]	3.519.048
Prihod od CTS-a [kn/god]	415.851
Troškovi goriva [kn/god]	1.800.528
Održavanje [kn/god]	597.785
Bruto godišnja dobit [kn/god]	5.582.383
Investicija [kn]	34.622.489
IRR [%]	7,73
NPV [kn]	4.736.924
Period povrata [god]	6,79

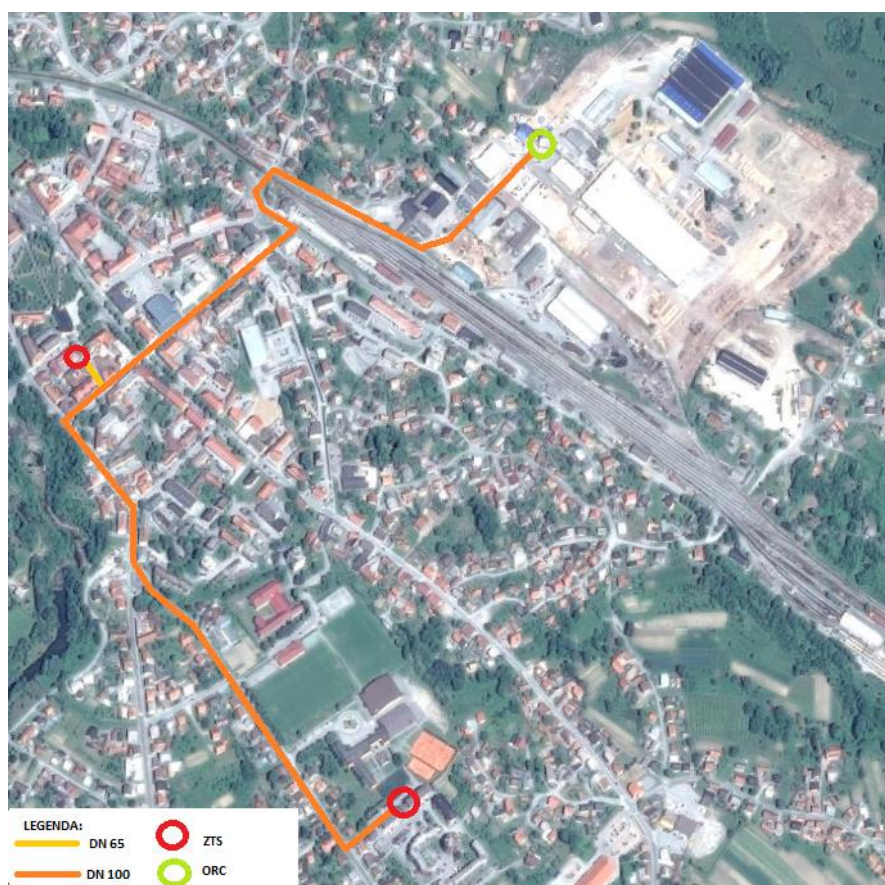
Analiza osjetljivosti pokazuje da je isplativost projekta najviše uvjetovana investicijskim troškovima, zatim referentnom vrijednosti električne energije i cijenom drvene sječke. Najmanju osjetljivost pokazuje prema promjeni cijene toplinske energije. I u ovom slučaju i bez prihoda od prodaje toplinske energije projekt pokazuje isplativost (NPV veći od 0). Analizu osjetljivosti prikazuje Slika 36.



Slika 36. Analiza osjetljivosti scenarija 3-b

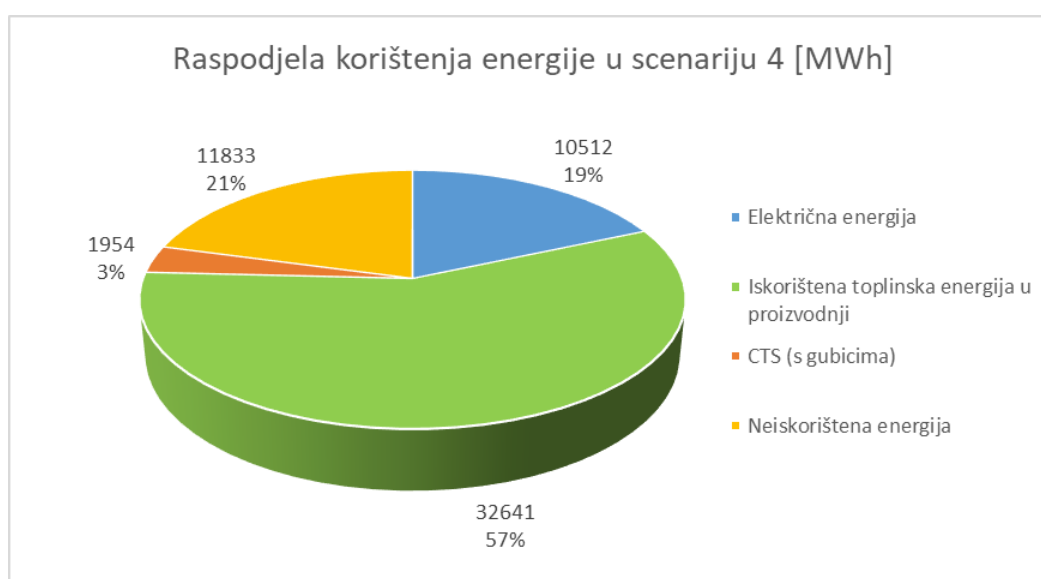
6.4. Scenarij 4

Scenarij 4 je sličan prethodnom, samo što se u ovom ulaže u spajanje na oba ZTS-a grada Ogulina. To znači da su odabrane cijevi većih promjera kako bi se zadovoljila godišnja potrošnja toplinske energije. Ukupno se iz ORC-a, za potrebe grijanja grada, odvodi 1.954 MWh/god. Od toga iznosa, u jedan ZTS dobavlja se 650 MWh/god, u drugi 1.136 MWh/god [52], a ostalih 168 MWh/god se gubi zbog toplinskih gubitaka u cjevovodu. Za odabir cijevi korištena je Tablica 5. Tako se pokazalo da se ovaj cjevovod mora u najvećoj dužini izgraditi od cijevi nazivnog promjera DN 100 i to u duljini 1.650 m, a priključak na jedan od ZTS-a u duljini od 30 m treba koristiti DN 65. Linearna gustoća toplinske energije u idućim podscenarijima iznosi 1,06 MWh/m što je više, nego u scenariju 3. Trasu s pripadajućim veličinama cijevi kao i lokacije objekata prikazuje Slika 37.



Slika 37. Trasa cjevovoda od ORC-a do oba ZTS-a grada Ogulina

Iskoristivost biomase u ovom scenariju penje se na 79% u usporedbi sa scenarijem 3. Razlog tomu je povećanje iskorištavanja toplinske energije u mreži zbog obuhvaćanja i 2. ZTS-a grada Ogulina.. Raspodjelu korištenja energije prikazuje Slika 38.



Slika 38. Raspodjela korištenja energije u scenariju 4

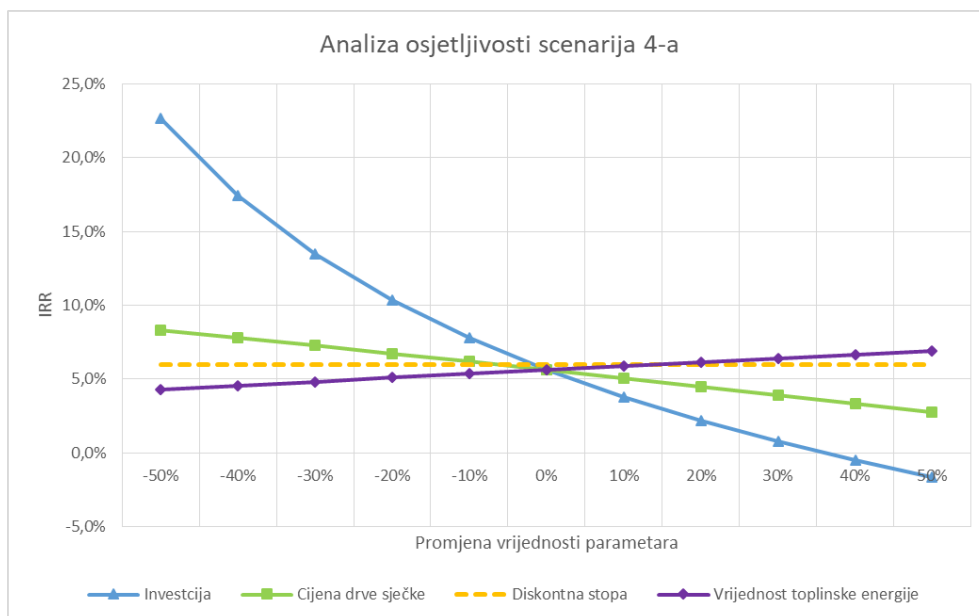
6.4.1. Scenarij 4-a

U ovom scenariju prihod od uštede električne energije jednak je kao i u scenariju 3-a, prihod od prodaje toplinske energije je povećan jer je na sustav spojeno više potrošača, ali su i investicijski troškovi znatno narasli. Zbog velikog povećanja investicijskog troška, a malog porasta prihoda od prodaje toplinske energije NPV u ovom slučaju iznosi 1.268.019 kn što je najmanji iznos u ovoj analizi. Ovdje se dobiva i najmanji IRR koji iznosi 5,62% što je ispod traženih 6%. Period povrata je 7,49 godina. Rezultate tehno-ekonomske analize prikazuje Tablica 17.

Tablica 17. Rezultati tehno-ekonomske analize scenarija 4-a

Proizvodnja električne energije [MWh/god]	10.512
Vlastita potrošnja električne energije [MWh/god]	10.512
Proizvodnja topline [MWh/god]	44.790
Potrošnja biomase [t/god]	16.269
Ukupni stupanj djelovanja [%]	79
Toplina predana u CTS [MWh/god]	1.954
Prihod od uštede električne energije [kn/god]	7.559.880
Prihod od CTS-a [kn/god]	854.770
Troškovi goriva [kn/god]	1.800.528
Održavanje [kn/god]	597.785
Bruto godišnja dobit [kn/god]	6.016.337
Investicija [kn]	41.597.543
IRR [%]	5,62
NPV [kn]	1.268.019
Period povrata [god]	7,49

Kao i u prethodnim primjerima, na isplativost investicije najviše utječe iznos investicije, zatim cijena drvene sječke i cijena toplinske energije. Cijena toplinske energije u ovom scenariju više utječe na isplativost investicije, nego što je to slučaj u scenariju 3, ali je njezin utjecaj i dalje najmanji u usporedbi s drugim parametrima. Da bi se postigla granična isplativost projekta (NPV=0) cijena toplinske energije mogla bi se smanjiti na iznos od 0,26 kn/kWh za kućanstva i 0,33 kn/kWh za poslovne objekte. Te cijene su dobivene tako da omjer cijena toplinske energije za kućanstva i poslovne objekte ostane isti kao omjer sadašnjih cijena (0,41 kn/kWh za kućanstva i 0,51 kn/kWh za poslovne objekte) Analizu osjetljivosti prikazuje Slika 39.



Slika 39. Analiza osjetljivosti scenarija 4-a

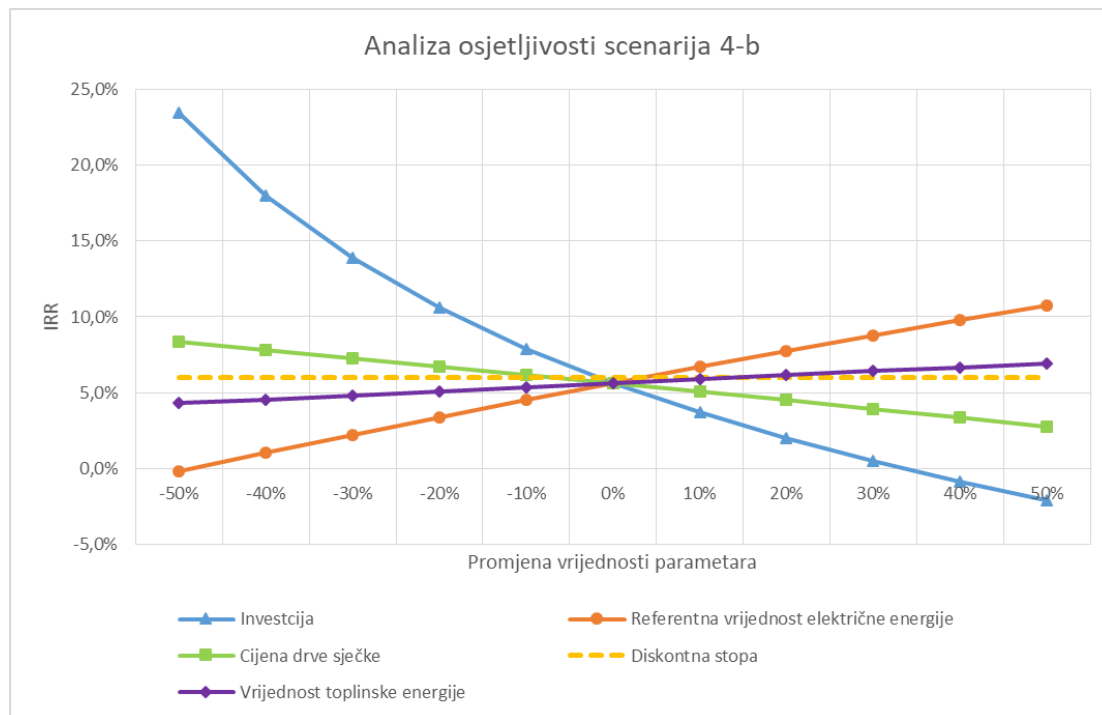
6.4.2. Scenarij 4-b

U ovom scenariju prihodi su neznatno veći nego u prethodnom scenariju zato što se u ovom slučaju postrojenje ušlo u sustav poticaja tržišnom premijom. Najviši iznosi prihoda od toplinske i električne energije rezultirali su najvećom godišnjom bruto dobiti. NPV je viši, nego u prethodnom podscenariju i iznosi 1.299.462 kn. IRR iznosi 5,64%, a period povrata 7,49 godine. Rezultate tehno-ekonomske analize ovog scenarija prikazuje Tablica 18.

Tablica 18. Rezultati tehno-ekonomske analize scenarija 4-b

Proizvodnja električne energije [MWh/god]	10.512
Vlastita potrošnja električne energije [MWh/god]	10.512
Proizvodnja topline [MWh/god]	44.790
Potrošnja biomase [t/god]	16.269
Ukupni stupanj djelovanja [%]	79
Toplina predana u CTS [MWh/god]	1.954
Prihod od prodaje električne energije [kn/god]	4.045.797
Prihod od tržišne premije [kn/god]	3.519.048
Prihod od CTS-a [kn/god]	854.770
Troškovi goriva [kn/god]	1.800.528
Održavanje [kn/god]	597.785
Bruto godišnja dobit [kn/god]	6.021.302
Investicija [kn]	41.597.543
IRR [%]	5,64
NPV [kn]	1.299.462
Period povrata [god]	7,49

Analiza osjetljivosti pokazala je isti utjecaj pojedinih parametara kao i u prethodnim primjerima. Najveći utjecaj na profitabilnost projekta i dalje ima iznos početne investicije, a najmanji utjecaj ima promjena cijene toplinske energije. Da bi projekt bio granično isplativ kućanstva bi mogla plaćati cijenu toplinske energije u iznosu od 0,26 kn/kWh, a poslovni objekti morali bi mogli plaćati 0,32 kn/kWh. Ti iznosi su određeni kao i u prethodnom scenariju. Analizu osjetljivosti prikazuje Slika 40.



Slika 40. Analiza osjetljivosti scenarija 4-b

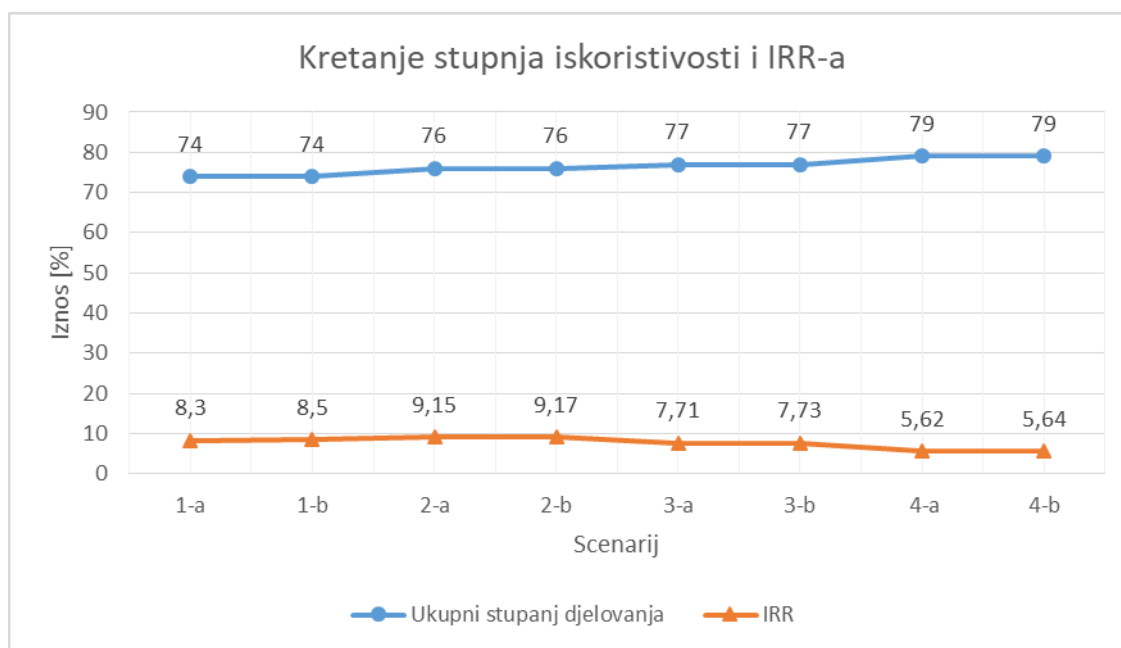
Zbirni prikaz rezultata tehno-ekonomske analize daje Tablica 19.

Tablica 19. Zbirni prikaz rezultata tehno-ekonomske analize scenarija

	Scenarij 1		Scenarij 2		Scenarij 3		Scenarij 4	
	1-a	1-b	2-a	2-b	3-a	3-b	4-a	4-b
Ukupni stupanj djelovanja [%]	74	74	76	76	77	77	79	79
Investicija [kn]	27.587.715	27.587.715	29.889.257	29.889.257	34.622.489	34.622.489	41.597.543	41.597.543
NPV [kn]	4.612.123	4.872.145	6.313.286	6.344.728	4.705.481	4.736.924	1.268.019	1.299.462
IRR [%]	8,3	8,5	9,15	9,17	7,71	7,73	5,62	5,64
PP [god]	6,62	6,56	6,38	6,37	6,8	6,79	7,49	7,49
Cijena toplinske energije (NPV=0) [kn/kWh]	-	-	-	-	kućanstva:- 0,78; poslovni objekti: - 0,97	kućanstva:- 0,77; poslovni objekti: - 0,96	kućanstva:- 0,33; poslovni objekti: 0,26	kućanstva:- 0,32; poslovni objekti: 0,26

Izračun cijene toplinske energije za kućanstva i poslovne objekte proveden je tako da se zadrži postojeći omjer cijena toplinske energije (0,41 kn/kWh za kućanstva i 0,51 kn/kWh za poslovne objekte što daje omjer od 1,244) u gradu Ogulinu. Vidljivo je da u 3. scenariju cijena postaje negativna što znači da bi vlasnik mogao plaćati potrošačima toplinsku energiju koju oni iskoriste. To naravno nije realno, a i IRR bi u tim slučajevima onda iznosio manje od traženih 6%. U 4. scenariju cijena za korisnike bi mogla biti nešto niža, ali to bi ujedino značilo da je IRR manji od traženih 6%.

Slika 41. prikazuje kretanje stupnja iskoristivosti i IRR-a.



Slika 41. Kretanje stupnja iskoristivosti i IRR-a

Iz gornjeg prikaza je vidljivo da za najveći IRR, u scenariju 2-b, dobivamo stupanj iskoristivosti od 76%, a da za najveći stupanj iskoristivosti dobivamo najmanji IRR u scenariju 4-a. Scenariji 3 i 4 bili bi najbolji i s tehničke strane (kao što je to sad slučaj) i s ekonomske da troškovi investicije u CTS nisu toliko veliki jer imaju najveće bruto prihode.

7. ZAKLJUČAK

Analiza scenarija pokazala je visoku iskoristivost biomase, u svim slučajevima višu od 70%. To je prvenstveno jer se ORC modul odabirao prema postojećim potrebama za toplinskom i električnom energijom. Iskoristivost bi mogla biti i veća da je poznata dinamika korištenja toplinske energije jer vjerojatno ne postoji trenutak kada je tvornica pod vršnim toplinskim opterećenjem, odnosno trenutak kada je svaka sastavnica proizvodnje pod vršnim toplinskim opterećenjem.

Da je postrojenje manje to bi smanjilo investicijske troškove i troškove biomase, uz već spomenuto povećanje iskoristivosti postrojenja. Unatoč tome što je postrojenje većih izlaznih toplinskih snaga, nego što bi to trebalo, ono i dalje ostvaruje povrat uložених sredstava unutar 10 godina i to u svim razmatranim scenarijima. Najveći prihod u scenarijima ostvarivao se od uštede ili prodaje električne energije. U stvarnosti oni projekti koji ostvare pravo na poticaj tržišnom premijom imaju veće prihode, dok je iznos uštede električne energije manji od ovdje računatog jer veliki potrošači imaju sklopljene posebne ugovore s distributerima, a koji nisu bili dostupni pri izradi ovog rada.

Ulaganje u CTS pokazalo se isplativim ako sredstva za izgradnju cjevovoda nisu previsoka. Povrat sredstava bio bi brži da se na cjevovod koji spaja postrojenje sa ZTS-ima priključe dodatni potrošači, a ne da on služi kao spoj dviju krajnjih točaka. U svim slučajevima, u kojima se odlučilo na prodaju toplinske energije, linearna gustoća toplinske energije je vrlo mala što ukazuje na upitnu isplativost spajanja na CTS bez dodatnih prihoda.

Kao ekonomski najisplativiji scenarij pokazao se scenarij u kojem je ORC dimenzioniran prema baznom električnom opterećenju postrojenja bez spajanja na CTS grada Ogulina. Stupanj iskoristivosti biomase u tom slučaju iznosi 76%, a pokazao je i najbolju stopu povrata uložених sredstava od 9,17%. Najveći stupanj iskoristivosti biomase pokazao je slučaj u kojem se dio energije iskorištava u CTS, no ekonomski pokazatelji tog scenarija nisu u potpunosti zadovoljavajući

Daljnijim ulaganjem u razvoj i proširenje CTS-a Ogulina omogućila bi se investitoru zadovoljavajuća dobit prilikom prodaje toplinske energije u mrežu, a grad bi ostvario glavni cilj ovakvih projekata, a to je: učinkovito korištenje energije, smanjenje emisija CO₂ te bi poticanje i zapošljavanje lokalnog poduzetništvo koje bi sa svojim radom i sirovinama sudjelovalo u ovom projektu što bi u konačnici vratilo sredstva gradu.

LITERATURA

- [1] United Nations Convention on Climate Change: Paris Agreement, 2015.
- [2] Nacionalni portal energetske učinkovitosti: Proizvodnja i potrošnja energije u Hrvatskoj, [Online] Dostupno: <https://www.enu.hr/ee-u-hrvatskoj/20-20-20-i-dalje/rezultati/energija-hr/> (Zadnji pristup 17.1.2019.)
- [3] Državni zavod za statistiku: Statistički ljetopis Republike Hrvatske 2018., [Online] Dostupno: https://www.dzs.hr/hrv/publication/stat_year.htm (Zadnji pristup 17.1.2019.)
- [4] Hrvatske šume: Cjenik glavnih šumskih proizvoda, 2017., [Online] Dostupno: <http://nadmetanja.hrsu.hr/indexArhivaNadmetanja.asp> (Zadnji pristup 17.1.2019.)
- [5] Zakon o obnovljivim izvorima energije i visokoučinkovitoj kogeneraciji NN 111/18
- [6] Nacrt prijedloga Uredbe o poticanju proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora energije i visokoučinkovitim kogeneracijama, [Online] Dostupno: <https://esavjetovanja.gov.hr/ECon/MainScreen?entityId=9767> (Zadnji pristup 17.1.2019.)
- [7] Šimić Z.: Energija biomase, [Online] Dostupno: <http://oie.mingo.hr/default.aspx?id=8> (Zadnji pristup 19.1.2019.)
- [8] Šljivac D., Šimić Z.: Obnovljivi izvori energije, Zagreb, 2009.
- [9] Posavec S., Zečić Ž., Beljan K., Šimunović N.: Izračun profitabilnosti i optimizacija kogeneracijskog postrojenja korištenjem drvene sječke, Zagreb, 2016.
- [10] Federal Ministry for Economic Affairs and Energy (BMWi): Renewable Energy Sources in Figures, 2016.
- [11] BioEnergy Consult: Biomass from Wood Processing Industries, [Online] Dostupno: <https://www.bioenergyconsult.com/biomass-from-wood-processing-industries/> (Zadnji pristup 19.1.2019.)
- [12] Loibnegger T.: Smjernice za primjenu normi za goriva iz drvene biomase, 2011.
- [13] NGENIEUERBÜRO DANNENBERG GmbH & Co. KG: Woodchip storage [Online] Dostupno: <http://www.ing-dannenberg.de/en/holzindustrie/produktionsanlage-fiberboard-gmbh/hackschnitzzellager/> (Zadnji pristup 19.1.2019.)
- [14] Sustainable energy agency: Woodfuel standards, [Online] Dostupno: <https://www.shawrenewables.co.uk/g30-wood-chip-specification/> (Zadnji pristup 19.1.2019.)
- [15] Lončar D., Krajačić G., Vujanović M.: Podrška developerima-primjeri najbolje prakse za kogeneraciju na drvenu biomasu, Zagreb, 2009.

-
- [16] Goleš N., Radica G., Bagavac P.: Analiza učinkovitosti mikrokogeneracijskog sustava, FESB Split
- [17] Integrated Waste Management modules for different courses of graduate studies: Biomass combustion processes, [Online] Dostupno: <http://www.invent.hs-bremen.de/> (Zadnji pristup 19.1.2019.)
- [18] ENERKON: Slavonija Drvena Industrija; Kogeneracija na biomasu „SLAVONIJA DI“
- [19] Quoilin S., Van Den Broek M., Declaye S., Dewallef P., Lemont V.: Techno-economic survey of Organic Rankine Cycle (ORC) systems, 2013.
- [20] Duvia A., Guercio A., Rossi di Schio C.: Technical and economic aspects of Biomass fuelled CHP plants based on ORC turbogenerators feeding existing district heating networks “
- [21] Bryszewska-Mazurek A., Mazurek W.: Cooperation of the Organic Rankine system with a cogeneration steam power plant – case study, 2018.
- [22] Ministarstvo gospodarstva, rada i poduzetništva: Nacionalni potencijal kogeneracije u Republici Hrvatskoj, 2009.
- [23] Vlada Republike Hrvatske: Izvješće o napretku Republike Hrvatske pri poticanju i uporabi energije iz obnovljivih izvora, 2018.
- [24] HROTE: Podaci iz sustava poticanja OIEiK-studeni 2018., [Online] Dostupno: <https://www.hrote.hr/2018-godina> (Zadnji pristup 22.1.2019.)
- [25] Ministarstvo zaštite okoliša i energetike: Registar obnovljivih izvora energije i kogeneracije te povlaštenih proizvođača (Registar OIEKPP), Dostupno: <https://www.mzoip.hr/hr/energetika/registar-oiekpp.html> (Zadnji pristup 22.1.2019.)
- [26] Euroheat and power: District Heating in Buildings, 2011.
- [27] Skagestad B., Mildenstein P.: District Heating and Cooling Connection Handbook, International energy agency IEA, UK
- [28] HEP-TOPLINARSTVO d.o.o.-Toplinarstvo u Republici Hrvatskoj 2000.-2025., 2002.
- [29] Ministarstvo zaštite okoliša i energetike-Energija u Hrvatskoj 2016.-Godišnji energetske pregled, 2016.
- [30] Energy Economics Group: Evaluation of the premium tariff versus fixed tariff, 2010.
- [31] 6th South East Europe Energy Dialogue-Feed-in Tariff vs. Feed-in Premium, Thessaloniki, 2012.
- [32] Goić R.-Zakon o OIEiVUK I Pravilnik o korištenju OIEiVUK, 2016.
- [33] Goić R.: Obnovljivi izvori energije u Hrvatskoj – danas i sutra, Energy investment forum 2016, 2016.
-

- [34] German Energy Agency: Process heat in industry and commerce-Technology solutions for waste heat utilisation and renewable provision, Berlin, 2016.
- [35] Zhan T., Jiang J., Xu J., Lu. J.: Process Optimization for Multi-Veneer Hot-Press Drying, 2015.
- [36] Tumulurum Shankar J.: Specific energy consumption and quality of wood pellets produced using high-moisture lodgepole pine grind in a flat die pellet mill, Idaho, USA, 2016.
- [37] Labanovska A., Vigants H., Blumberga D.: Energy management in wood pellets production, 2016.
- [38] Biomass Briquettes - Production), Dostupno:
https://energypedia.info/wiki/Biomass_Briquettes_-_Production (Zadnji pristup: 28.1.2019.)
- [39] Dorotić H.: Diplomski rad: Tehno-ekonomska analiza implementacije centraliziranog sustava grijanja na biomasu na primjeru grada Ogulina, Zagreb, 2016.
- [40] Ministarstvo gospodarstva: Program korištenja potencijala za učinkovitost u grijanju i hlađenju za razdoblje 2016. – 2030., 2015.
- [41] Danish Energy Agency: District Heating Assessment Tool (DHAT), Dostupno:
<https://ens.dk/en/our-responsibilities/global-cooperation/district-heating-assessment-tool-dhat> (Zadnji pristup: 28.1.2019.)
- [42] CROPEX: Rezultati poslovanja tržišta dan unaprijed, Dostupno:
<https://www.cropex.hr/hr/rezultati-trgovanja/trgovanje-za-dan-unaprijed/rezultati-dan-unaprijed-tr%C5%BEi%C5%A1ta.html> (Zadnji pristup: 28.1.2019.)
- [43] Legal sources on renewable energy: Premium market (Market premium) Germany, Dostupno: <http://www.res-legal.eu/search-by-country/germany/single/s/res-e/t/promotion/aid/premium-tariff-i-market-premium/lastp/135/> (Zadnji pristup: 28.1.2019.)
- [44] HEP: Tarifne stavke (cijene) električne energije, Dostupno:
<http://www.hep.hr/elektra/poduzetnistvo/tarifne-stavke-cijene-1578/1578> (Zadnji pristup: 28.1.2019.)
- [45] Stambeno komunalno gospodarstvo d.o.o. Ogulin: Cjenik usluge grijanja, Dostupno:
<http://www.skg-ogulin.hr/> (Zadnji pristup: 28.1.2019.)
- [46] Addai-Asante S., Hao T.: Techno-Economic Analysis of Biomass Integrated Electricity Generation System, 2017.

-
- [47] Lemmens S.: Technological innovation in the energy sector: case of the organic Rankine cycle, 2017.
- [48] Istraživanje tržišta: Troškovnik građevinskih i montažerskih radova
- [49] Grad Ogulin: Bjelin-Priznanje grada Ogulina za stvaralački rad u 2017., Dostupno: <https://www.youtube.com/watch?v=p7OaFOf2JxA> (Zadnji pristup: 28.1.2019.)
- [50] Postrojenje Bjelin, Dostupno: <http://www.tehnodrvo.hr/o-nama.html> (Zadnji pristup: 28.1.2019.)
- [51] Turboden: Turboden ORC: provjerena tehnologija za kogeneracije na biomasu
- [52] Ministarstvo gospodarstva: Program korištenja potencijala za učinkovitost u grijanju i hlađenju za razdoblje 2016.-2030., 2015.
- [53] Tihomir Capan: Završni rad, Zagreb, 2017.
- [54] Hrvatska narodna banka: Informacija o kamatnim stopama, Dostupno: <https://www.hnb.hr/-/kamatne-sto-1> (Zadnji pristup: 28.1.2019.)
- [55] VALDEZ: Amortizacija imovine, amortizacijske stope i rashodovanje, Dostupno: <https://www.virtualni-ured.net/racunovodstvo/item/321-stope-amortizacije-otpisa-dugotrajne-imovine.html> (Zadnji pristup: 28.1.2019.)
- [56] Porezna uprava: Porez na dobit, Dostupno: <https://www.porezna-uprava.hr/obrtnici/Stranice/Porez-na-dobit.aspx> (Zadnji pristup: 28.1.2019.)
- [57] Heat Network Partnership for Scotland: District Heating Strategy Factsheet

PRILOZI

CD-R disc